Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

STAMMZELLEN
WER HAT HIER DIE MORAL GEPACHTET?

Spektrum DER WISSENSCHAFT
JUNI 2008 6/08

TECHNOLOGIE
Nano-Batterien für Biosensoren

ETHNOLOGIE
Bizarre Totenkulte auf Neuguinea

FORTBEWEGUNG
Was Laufen, Fliegen und Schwimmen verbindet

Die chaotische Geburt der Planeten

Wie Zufallskollisionen und Schleudereffekte neue Sonnensysteme formen

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E
4 194058 407402 06

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Schneebälle in der Wäscheschleuder

Mitte April hat der Deutsche Bundestag endlich entschieden: Das so genannte Stammzellgesetz wird reformiert, jedoch nur minimal. Allein der Stichtag, bis zu dem Stammzelllinien existieren müssen, damit sie importiert werden dürfen, wird verschoben. Es liegt wohl im Wesen eines politischen Kompromisses, dass die Widersprüche, die ihn schon 2002 belasteten, damit nur fortgeschrieben wurden, die praktischen wie ethischen Fragen aber weiterhin offen geblieben sind.

Der Medizinethiker **Urban Wiesing** von der Universität Tübingen analysiert diesen im Grunde unhaltbaren Zustand. Denn die eigentliche Entscheidung ist damit nur aufgeschoben – die Debatte kommt wieder. Wo übrigens Stammzellen im medizinischen Alltag längst heilende Wirkung entfalten, erklärt der Heidelberger Krebsforscher Anthony Ho im Interview (S. 84 und S. 53).

Es ist schon eine Weile her, dass ich Douglas Lin für ein Interview in seinem Labor besuchte. Der Planetenforscher war damals an der University of California in Santa Cruz, wo er schon länger arbeitete, gerade zum Professor ernannt worden. Mit fast kindlicher Freude führte er mich in seinem Labor zu einer Art senkrecht stehender Wäscheschleuder. Darin wollte er zumindest im Prinzip simulieren, wie auf einer langsam rotierenden Scheibe kleine Schnee- und Eisklumpen miteinander kollidieren und zusammenbacken.

Es ging dem US-Amerikaner, der in Peking aufwuchs, dabei um die planetaren Prozesse im frühen Sonnensystem. Seitdem hat er seine Interessengebiete kräftig erweitert. Er forscht jetzt unter anderem über die frühesten Sterne, protostellare Scheiben und Zwerggalaxien. Längst ist er auch ein international gefragter Forschungsmanager, etwa als Mitglied des Planetensuchprogramms der NASA, als Gründungsdirektor des Kavli-Instituts für Astronomie und Astrophysik in Peking oder als Direktor am California Space Institute. Seine Begeisterung für die Planetenentstehung hat er bei alldem nicht verloren, was sein Artikel belegt (S. 24).

LI SHILIN

Douglas N. C. Lin vor der Universität von Peking

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Ein Thema hat die Öffentlichkeit in den letzten Monaten viel beschäftigt: das Übergewicht. Über die Hälfte aller Deutschen leidet inzwischen darunter, während in manchen Entwicklungsländern Übergewicht und Hunger zugleich herrschen. Unser Sonderheft trägt nicht zu Unrecht den Untertitel: »Die neue Weltseuche«.

Ein weiteres Sonderheft befasst sich mit der Immunabwehr. Es enthält unsere wichtigsten Beiträge der letzten Jahre zu diesem Thema in aktualisierter Form. In Zeiten multiresistenter »Superkeime« und neuer Epidemien ebenfalls eine bedrohlicher Aspekt unseres globalen Zusammenlebens.

INHALT

JUNI 2008

ASTRONOMIE & PHYSIK Fortbewegung nach Schema F **34**

MEDIZIN & BIOLOGIE
DNA-Stammbaum der Katzen

MEDIZIN & BIOLOGIE
Entdeckung der Chromosomenzahl

46

ERDE & UMWELT
Kulturquelle: Wasser aus der Eiszeit

AKTUELL

10 Spektrogramm
Der kleine (Gang-)Unterschied · Wasserfälle im Grönlandeis · Hormongesteuerte Börsenmakler · Ältestes Schmuckstück Amerikas · Flatternde Förster u. a.

13 Bild des Monats
Tanne im Nanowald

14 Verschränkung zweier Spiegel 🔊
Lassen sich quantenmechanische Paradoxien in der Alltagswelt demonstrieren?

16 DNA wie einen Strichkode lesen 🔊
Neues Verfahren zur schnellen Entzifferung des Erbguts

19 Selbstheilendes Gummi 🔊
Zerschneiden, Enden zusammendrücken – hält!

20 Kabelloses Retina-Implantat 🔊
Sehprothese für Blinde hat erste klinische Tests bestanden

23 Springers Einwürfe
Geschlechterkampf im Internet

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITEL

24 Die Geburt der Planeten
Sie ist nicht, wie lange gedacht, ein vorgezeichneter Prozess mit absehbarem Ergebnis, sondern verläuft erstaunlich chaotisch

34 ▶ Grundgesetze der Bewegung
Die Fortbewegungsarten von Vierbeinern, Vögeln und Fischen unterliegen, so unterschiedlich sie anmuten, einheitlichen Gesetzmäßigkeiten

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

42 Geometrische Folgen
Logarithmische Skalen erlauben die Beherrschung aller Größenordnungen, führen aber zu Pseudo-Einheiten

Titelmotiv: Don Dixon

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio

MEDIZIN & BIOLOGIE

46 Wie viele Chromosomen?
Schon erstaunlich – aber die korrekte Zahl menschlicher Chromosomen wurde erst nach der DNA-Doppelhelix aufgeklärt

54 Der Stammbaum der Katzen
Durch Genanalysen ließen sich endlich die Abstammungsverhältnisse aller heutigen Katzenarten klären – vom Tiger bis zur Hauskatze

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial:
Schneebälle in der Wäscheschleuder
8 Leserbriefe
9 Impressum
89 Im Rückblick
98 Rezensionen:
I. und G. Bogdanov *Reise zur Stunde null*
E. Kaplan, M. Kaplan *Eins zu Tausend*
G. Walker und D. King *Ganz heiß*
K. Bayertz, M. Gerhard und W. Jaeschke (Hg.) *Weltanschauung, Philosophie und Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert*
A. Fawer *Gnosis*
K. Richarz und M. Hormann *Nisthilfen für Vögel*
106 Vorschau

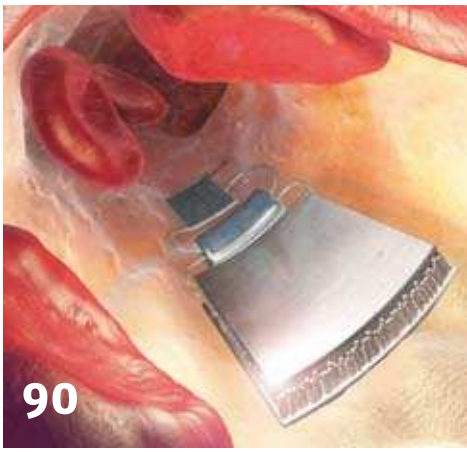
TITELTHEMA

Planetengeburt aus dem Chaos 24

74

MENSCH & GEIST

Totenkult in der Südsee



90

TECHNIK & COMPUTER

Stromgeneratoren im Nanoformat

ERDE & UMWELT

62 **Die Quellen von Dilmun**
Artesische Quellen ließen auf der Wüsteninsel Bahrain eine Hochkultur erblühen, die schon im Gilgamesch-Epos erwähnt wird. Inzwischen sind sie durch Übernutzung versiegt

IN DIESEM HEFT: **SciTechs**
Magazin für Technologietransfer

MENSCH & GEIST

74 ▶ **Kunst der Geister**
Masken, aus Holz, Schneckengehäusen und anderen Materialien kunstvoll gefertigt, bannen auf der Südseeinsel Neuirland die Geister der Toten

ESSAY

84 ▶ **Fauler Stammzellkompromiss**
Der Medizinethiker Urban Wiesing über Politik und Moral

INTERVIEW

53 **Stammzellforscher Anthony Ho**
»Wir stehen erst ganz am Anfang«

TECHNIK & COMPUTER

90 ▶ **Kraftwerke im Nanoreich**
Winzige Generatoren könnten Nanosysteme kontinuierlich mit Strom versorgen, indem sie Energie aus ihrer Umgebung gewinnen – sei es aus Schallwellen oder dem Blutfluss im Körper

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

96 **Sieden, Cracken, Veredeln**
Damit aus Erdöl Benzin, Diesel oder Plastik wird, muss es erst einmal verdampfen

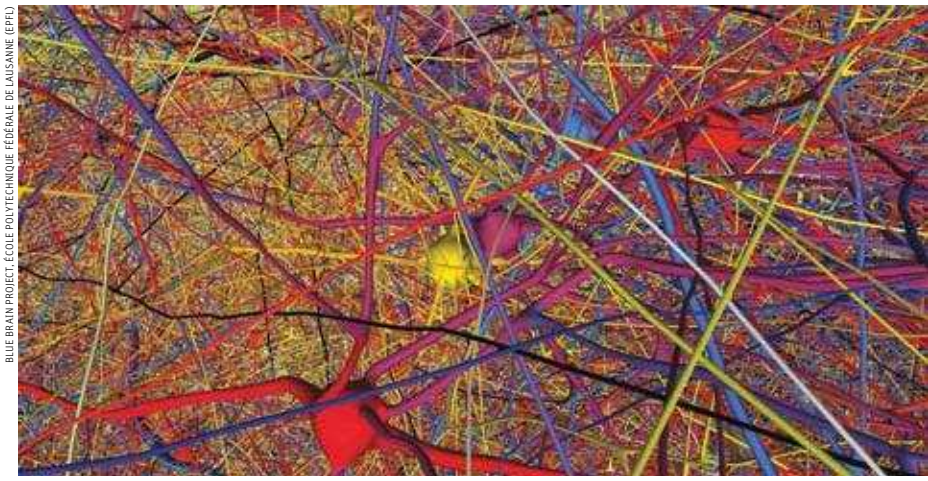
Energie aus der Natur

e·on
Neue Energie

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf **www.spektrum.de**. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

GOLD & APPLE (WWW.GOLD10APPLE.DE)



BLUE BRAIN PROJECT, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL)

TIPPS **Lieber zuhören als lesen?**
www.spektrum.de/hoeren

FÜR ABONNENTEN **»Blue Brain – das simulierte Gehirn«**
www.spektrum-plus.de

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Spuren des Klimawandels

Klimatische Veränderungen betreffen uns immer stärker: Die Zahl der Hurrikane nimmt zu, bevorstehende Dürren bedrohen die Ernährungslage, und in der Antarktis, dem größten Gefrierschrank der Erde, herrscht Tauwetter. **spektrumdirekt** berichtet über Fakten und Folgen:
www.spektrumdirekt.de/klima

Runde Tage rund um die Wissenschaft

Große Entdecker, große Entdeckungen – anlässlich wichtiger Jahrestage wirft **spektrumdirekt** Blicke zurück in die jüngere und ältere Geschichte – auf große Physiker und den Entdecker des LSD, auf Polarschiffe und das erste Computervirus:
www.spektrumdirekt.de/rueckblick

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Noch mehr Spektrum?

Von der Geometrie über die Ursache von Süchten bis hin zur Chemie: Allein in diesem Jahr haben wir bereits fünf Sonderhefte zu verschiedenen Themen veröffentlicht. Sie brauchen nicht einmal mehr zum Kiosk zu laufen. Per Klick bestellen Sie die Print-Ausgabe oder laden sich das Heft als Datei im PDF-Format herunter!
www.spektrum.de/sonderhefte

Lieber zuhören als lesen?

Eine Artikelauswahl aus dem Spektrum-Magazin als Hörbuch? Einzelne Artikel, gekürzt und professionell gelesen? Oder hören Sie lieber Arvid Leyh zu (Foto oben links), der Autoren und Redakteure im Spektrum Talk interviewt? Das alles bieten wir unter
www.spektrum.de/hoeren

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Ihre Favoriten aus drei Jahrzehnten

Weit über 400 Titelseiten zierten die Monatsausgaben und Sonderhefte von Spektrum der Wissenschaft. Schreiben Sie uns, welche davon Ihnen am besten gefielen – und warum! Ihre Anworten veröffentlichen wir auf
www.spektrum.de/jubilaeum

Der Fürst der Mathematik

»… ich kann nicht daran arbeiten, denn ich müsste mich selbst loben, da ich vor 20 Jahren diese Gedanken schon niederschrieb …« – Hubert Manias Biografie über Carl Friedrich Gauß steckt voller Anekdoten, lesenswerter Details und Darstellungen wichtiger mathematischer Arbeiten. Lesen Sie die Rezension oder schreiben Sie selbst über das Buch!
www.spektrumdirekt.de/artikel/951528

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Blue Brain – das simulierte Gehirn«

Wie findet man heraus, wie das menschliche Denkorgan funktioniert? Indem man es in einem Supercomputer nachbaut, meint eine Schweizer Forschergruppe – und simuliert dazu erst einmal einen Kubikmillimeter Rattenhirn

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **epoc** und **Sterne&Weltraum** kostenlos online lesen*

»Wie viel Energie liefert uns die Sonne?«

Dietrich Labs, der nun im Alter von 86 Jahren starb, ermittelte die genauesten Werte für den Energiefluss von der Sonne. Sein Solspec-Instrument arbeitet derzeit sogar auf der Internationalen Raumstation ISS

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE&WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/947805

»Albträume der Moderne«

Anonyme Mächte, die in das Schicksal eingreifen, dem Menschen sogar das Menschsein nehmen – Franz Kafka beschrieb die Ängste der Moderne in beklemmenden Geschichten. Ein Resümee der Kafka-Forschung anlässlich seines 125. Geburtstags

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

www.epoc.de/artikel/952102

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Von Molekülen, Ozeanfahrten und Frauen in der Wissenschaft

Viele Blogger, viele Wissenschaftswelten: Der Ozeanograf **Martin Visbeck** berichtet derzeit vom Forschungsschiff »Maria S. Merian« über neu entdeckte Sauerstofflöcher im Ozean; neu im Team ist die Polymerchemikerin **Claudia Kaiser**, die sich »Exciting Molecules« widmet; und die Physikerin **Mierk Schwabe** fragt in »Zündspannung«: Werden Publikationen häufiger abgelehnt, wenn sie von Frauen verfasst werden? Diskutieren Sie mit – über dies und vieles mehr!

www.wissenslogs.de
www.scilogs.de

Für Sie machen wir weltweit viel Wind.

Für den Einsatz von Erneuerbaren Energien engagieren wir uns weltweit. So gehen wir zum Beispiel überall dorthin, wo wir die Kraft des Windes für Sie nutzen können – auch ins Wasser: Vor der Küste Englands betreibt E.ON bereits einen Offshore-Park mit 30 Windanlagen, der rund 33.000 Haushalte mit Energie versorgen kann. Und in Deutschland entsteht „Alpha Ventus" – der erste Windpark der Welt, der von uns auf dem offenen Meer errichtet wird. Das ist eine große Herausforderung – denn die Windanlagen werden 45 km vor Borkum unter rauen Hochsee-Bedingungen in 30 Meter tiefem Wasser installiert. Ob Meer oder Land: wir sind an vielen Orten Europas und in Nordamerika für Sie bereits hart am Wind. Und in Zukunft sollen es noch mehr werden.
Ein weltweites Engagement in Erneuerbare Energien, das uns allen zugutekommt.

Mehr zu unserem Engagement in Erneuerbare Energien erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

Energieversorgung in Zeiten des Klimawandels

April 2008

CO_2 in der Atmosphäre

Sie sagen, dass das einmal entstandene CO_2 nicht mehr aus der Atmosphäre zurückgeholt werden kann.

Meines Wissens stimmt das nicht, denn Pflanzen zum Beispiel benutzen CO_2 bei der Fotosynthese, um daraus Glukose zu machen. Als ich dies gelesen habe, hat mir der Artikel irgendwie keinen Spaß mehr gemacht, obwohl ich das Thema sehr spannend finde. So ein Fehler darf nicht passieren, denke ich.

Daniel Neike, Aachen

Antwort des Autors Prof. Konrad Kleinknecht:

Wenn Sie in meinem Buch (Wer im Treibhaus sitzt – wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen) die Seite 163 aufschlagen, sehen Sie die Entwicklung der CO_2-Konzentration von 1957 bis 2006, gemessen von Charles Keeling auf Mauna Loa, Hawaii. Daraus können Sie entnehmen, dass in der Tat im Sommer die Pflanzen der Nordhalbkugel den CO_2-Gehalt der Atmosphäre geringfügig absenken (um etwa 5 ppm), im Winter geht der Wert dann wieder nach oben, weil die Blätter abfallen und vermodern. Die Südhalbkugel hat viel weniger Pflanzen, deshalb der Effekt der »Atmung« der Biosphäre.

Aber dieser Effekt wird überlagert vom unaufhaltsamen Anstieg der CO_2-Konzentration durch die Verbrennung der fossilen Brennstoffe Kohle, Erdöl, Erdgas. Auch werden Regenwälder abgeholzt oder verbrannt, um die Landflächen zur Gewinnung von Bioethanol zu nutzen. Dieser Anstieg von 280 ppm im Jahr 1840 auf 385 ppm im Jahr 2006 kommt daher, dass das anthropogene CO_2 überwiegend nicht im Meer gelöst werden kann, sondern in die Atmosphäre geht und dort bleibt. Wie Sie sehen, ist der menschengemachte Anstieg (105 ppm) inzwischen 20-mal größer als der jährliche Atmungseffekt der Biosphäre.

Wir verbrennen im Augenblick so viel fossile Brennstoffe, wie in 10 000 Jahren (in der Karbonzeit vor 400 Millionen Jahren) durch Fotosynthese und anschließende anaerobe Zersetzung gebildet wurden. Das sind 28 Milliarden Tonnen CO_2.

Hoher Transportaufwand für CO_2

Der benötigte Aufwand für den Schienentransport von CO_2 aus deutschen Kraftwerksanlagen läge um ein Mehrfaches höher, als die von Herrn Kleinknecht errechneten 300 Güterzüge. Geht man von den genannten 400 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr aus, die eingelagert werden müssten, so sind das zirka 1,1 Millionen Tonnen pro Tag. Es gibt zwar Bestückungsmöglichkeiten für Güterzüge bis zu 3000 Tonnen, doch üblich ist ein Gesamtgewicht von 1000 bis maximal 1500 Tonnen.

Beim Transport von flüssigem CO_2 geht bis zur Hälfte des beförderten Gewichts auf die dazu erforderlichen Sonderbehälter. Einer Studie der Chalmers-Universität in Göteborg zufolge kann deshalb ein Zug mit 14 Tankwagen lediglich 770 Tonnen CO_2 befördern. Damit erhöht sich die Zahl der täglich benötigten Zugtransporte auf 1400,

Mögliche gegen sichere Gefahr tauschen

Masterplan für das Solarzeitalter
März 2008

Kernkraftwerke sind gefährlich. Deshalb müssen sie abgestellt werden. Das zumindest verbreiten einige Politiker. Doch was passiert dann?

Das Ziel Deutschlands ist erklärtermaßen, den Kohlendioxidausstoß zu verringern. Dazu soll bis 2020 der Anteil der alternativen Energieformen am Energiemix auf bis zu 30 Prozent erhöht und gleichzeitig der Atomausstieg vollzogen werden. Deutschland hat einen Anteil von 28 Prozent Atomenergie am gesamten Energiemix. Das heißt, wenn wir aus der Atomenergie aussteigen und die alternativen Energien ausbauen, ändert sich nichts am Anteil von Kohle und Erdöl am Energiemix und der CO_2-Ausstoß wird nur minimal verringert. Das ist sicher auch gefährlich, denn es treibt den Klimawandel an. Was also getan werden soll, ist eine mögliche Gefahr (Atomkraftwerke) gegen eine sichere Gefahr (Klimawandel) einzutauschen. Die Ängste vor Atomkraftwerken werden größtenteils durch den GAU von Tschernobyl getragen. Er hätte verhindert werden können, wenn alle Sicherheitstests vor der Inbetriebnahme des Reaktors durchgeführt worden wären. Zudem wird dieser relativ unsichere Reaktortyp nicht mehr gebaut, womit die Risiken doch stark dezimiert wären.

Außerdem bleibt der Risikofaktor eines Unfalls in einem Kohlekraftwerk. Beispielsweise wenn es einen Brand gäbe und das Kraftwerk explodieren würde. Dann würde überall Kohlestaub verteilt werden, und somit lägen die Feinstaubwerte sicher so hoch wie in Diskotheken oder Bars.

Jonas Reuter, Bonn

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

US-Bericht WSEG No. 50 nicht mehr geheim

Die Parallelwelten des Hugh Everett
April 2008

In diesem Artikel wird auf S. 28 behauptet, dass der US-Bericht »WSEG No. 50«, an welchem auch Everett mitgearbeitet hatte, bis heute unter Geheimhaltung steht. Dies stimmt offensichtlich nicht. Nach kurzer Suche fand ich auf der offiziellen Seite des Department of Defense einen Link zu dem über 100 Seiten langen PDF-Dokument WSEG 50. Hier der Link: www.dod.mil/pubs/foi/wseg/ (Titel: »Changes in the Free World WSEG Report No. 50«).

Peter Maier, Wien

Die Pflanzen der Nordhalbkugel können im Sommer den Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre herabsetzen, aber nur sehr geringfügig.

SANDOR JACKAL / FOTOLIA

was aber durch Leerfahrten von den Lagerstätten zurück wieder verdoppelt wird. Diese insgesamt 2800 Fahrten bedeuten, dass alle 30 Sekunden ein Zug irgendwo in Deutschland abfahren müsste, um die CO_2-Transportleistungen aufrechtzuerhalten.

400 Millionen Jahrestonnen sind übrigens in etwa die fünffache Menge, die in der DDR an Braunkohleprodukten auf der Schiene befördert wurde, was sehr oft zur Verspätung des sonstigen Zugverkehrs führte.

Jeffrey Michel, Deutzen

Antwort des Autors Prof. Konrad Kleinknecht:
Diese Angaben zur Tonnage von Güterzügen verdeutlichen, dass ein Transport per Bahn unvorstellbar ist. Als Alternative bleibt nur der Bau von etwa 20 Pipelines von Nordrhein-Westfalen in die norddeutsche Tiefebene oder an die Küste zur Endlagerung.

Die Umsetzung eines solchen Plans wird sicherlich nicht vor 2020 möglich sein, sodass diese Technik für das Klimaziel 2020 keinen Beitrag leisten kann.

Antwort des Autors Peter Byrne:
Dank der Beharrlichkeit vieler Antragsteller, darunter auch ich, die sich auf den Freedom of Information Act beriefen (das US-Gesetz gibt Bürgern das Recht auf Einsicht in Regierungsdokumente, *die Red.*), stellt das US-Verteidigungsministerium bearbeitete Fassungen der WSEG-Dokumente allmählich online zur Verfügung. In meiner Biografie über Everett (»The Devil's Pitchfork«, Oxford University Press), die 2009 erscheinen soll, werde ich darüber berichten.

Abweichler mitwirken lassen

Vermischung von Wissenschaft und Politik, Rezensionen, März 2008

In der Rezension über das Buch »Der UN-Weltklimareport« wird von Vermischung von Wissenschaft und Politik gesprochen und davon, dass Laien sich nach dem Inhalt schwerlich eine Meinung zum Thema bilden können.

Leider wird häufig die Wissenschaft als Magd der Politik missbraucht, obwohl für den Maßstab der in der höheren Rechtsprechung übliche »Stand der Wissenschaft« benutzt werden sollte. Und dabei kann es nicht sein, dass einzelne oder Gruppen von Wissenschaftlern bestimmen, was der Stand ist. Der Gummi-Begriff der herrschenden Meinung kann gerade im Klimabereich dazu verführen, die entgegenstehenden Kritiker einfach zu negieren oder sie abzuqualifizieren.

Das Umweltministerium hat einen Beirat, der als sachverständig operiert, aber dem es offensichtlich in der Zusammensetzung an Ausgewogenheit und Objektivität fehlt. Hier sollte man sich streng an die Regeln für eine Normenherstellung halten, das heißt auch »Abweichler« sollten beim Zustandekommen mitwirken.

»Spektrum der Wissenschaft« sollte Lob gezollt werden, weil es das Vermengen von geistigen Ideen und realen Fakten zur Sprache bringt und zu wissenschaftlichen Diskussionen anregt. Das lässt hoffen.

Dr.-Ing. Adalbert Rabich, Dülmen

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Frank Schubert, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel, Roland Wengenmayr.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.12.2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

VERHALTEN

Der kleine (Gang-)Unterschied

Aufgeklebte Leuchtmarker verraten die abstrakten Merkmale des Gangs von Versuchspersonen.

■ Hüftschwung oder Cowboyschritt – Frauen und Männer gehen einfach anders. Um die Bedeutung dieses Unterschieds zu ergründen, bestückte der Bochumer Psychologe Andrej König Probanden zwischen vier und 30 Jahren mit reflektierenden Markern und zeichnete ihren Gang in einem abgedunkelten Raum mit einer Hochgeschwindigkeitskamera auf. Die Bewegungen der Leuchtpunkte übertrug er auf stilisierte Strichmännchen. Die so animierten Figuren wurden dann menschlichen Betrachtern gezeigt. Diese sollten das mutmaßliche Geschlecht und Alter angeben.

Dabei erreichten sie erstaunlich hohe Trefferquoten von bis zu 90 Prozent. Generell noch etwas besser schnitt ein eigens entwickeltes Computerprogramm ab, das mit den Daten gefüttert wurde. Interessant ist, dass schon bei Kindern klar erkennbare Unterschiede im Gang bestehen. Demnach nehmen sie nicht erst nach der Pubertät das geschlechtstypische Bewegungsmuster an – auch wenn es sich im Erwachsenenalter verstärkt.

Die Experimente zeigten außerdem die sexuelle Orientierung der Betrachter an: Heterosexuelle fanden die Schritte des anderen, Homosexuelle die ihres eigenen Geschlechts attraktiver. In beiden Fällen wirkte jedoch nur das Gangbild von Personen ab einem Alter von etwa 20 Jahren anziehend.

Anders verhielt es sich bei Sexualstraftätern, die wegen Kindesmissbrauchs verurteilt waren. Sie fanden im Durchschnitt die Bewegungsmuster von Kindern attraktiver als die von Erwachsenen. Derartige Tests könnten somit, hofft der Wissenschaftler, ein Hilfsmittel bei der Diagnose von Pädophilie sein.

Pressemitteilung der Universität Bochum

GLAZIOLOGIE

Wasserfälle im Grönlandeis

■ Jeden Sommer bilden sich an der Oberfläche von Grönlands Inlandeis tausende Schmelzwasserseen, die manchmal binnen kurzer Zeit spurlos verschwinden. Glaziologen um Sarah Das von der Woods Hole Oceanographic Institution konnten diesen Vorgang kürzlich erstmals live studieren und haben die Ergebnisse jetzt veröffentlicht. Unter einem mehr als fünf Quadratkilometer großen See öffnete sich eine Spalte, durch die sich das Becken binnen 90 Minuten wie eine gigantische Badewanne leerte – wobei mehr Wasser pro Sekunde in die Tiefe stürzte als bei den Niagarafällen.

Anhand seismischer und anderer Untersuchungen fanden die Forscher heraus, dass das Seewasser durch sein Gewicht Risse im Eis aufstemmte und bis zum Gesteinsgrund durchbrach. Dort wirkte es als Schmiermittel und verringerte die Reibung; dadurch verdoppelte sich die Fließgeschwindigkeit der Eismassen am Ort des ehemaligen Sees.

Solche Vorgänge könnten fatale Auswirkungen haben. Durch den Klimawandel entsteht immer mehr Schmelzwasser. Wenn es durch Spalten zur Gletschersohle gelangt, könnte es dafür sorgen, dass große Mengen Eis schneller ins Meer gleiten und den Meeresspiegel rapide ansteigen lassen.

Vorerst scheint der Effekt aber noch begrenzt zu sein. Wie der Vergleich zwischen im Sommer und Winter gemessenen Fließgeschwindigkeiten ergab, trägt die Wasserschmierung bei den schnell strömenden Auslassgletschern, über die das meiste Eis ins Meer gelangt, nur maximal 15 Prozent zur jährlichen Wanderbewegung bei.

Science, Online-Vorabveröffentlichung

Schmelzwasser auf der grönländischen Eiskappe stürzt durch einen Spalt in die Tiefe.

HIRNFORSCHUNG

Geringer Status fördert Sucht

■ Drogen gelten vor allem als Problem der niederen sozialen Schichten. Dass ein untergeordneter Status in der Tat die Neigung fördert, sich in den Rausch zu flüchten, haben Wissenschaftler nun nachgewiesen. Sie untersuchten allerdings nicht Menschen, sondern Javaneraffen.

Diese Meerkatzenart lebt in Gruppen mit einer klaren hierarchischen Ordnung. Die Psychologen Robert Warren Gould und Michael A. Nader von der Wake Forest University in Winston-Salem (North Carolina) verglichen in Verhaltensstudien hoch- und niederrangige Tiere. Die Affen wurden dabei in einen neuen Käfig mit unbekannten Artgenossen gebracht und so unter Stress gesetzt. Anschließend konnten sie sich entweder an Futter oder Kokain bedienen. Wie sich zeigte, griffen Tiere, die tiefer in der Rangordnung standen, häufiger zur Droge als ihre dominanten Artgenossen.

Eine mögliche Erklärung lieferten Untersuchungen der Hirnaktivität vor und während des Experiments. Sie zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen. Bei rangniederen Affen herrschte im Normalzustand in Hirnbereichen, die mit emotionalen Zuständen zu tun haben,

ÖKOLOGIE

Flatternde Förster

■ Tropische Regenwälder binden große Mengen an Kohlendioxid und beherbergen einen erheblichen Teil der globalen Artenvielfalt. Sie gelten daher als besonders wertvolle Ökosysteme. Doch sie schrumpfen weltweit – vor allem durch Holzeinschlag und Brandrodung zur Gewinnung von Ackerland. Die gerodeten Flächen verwandeln sich allerdings schon nach wenigen Jahren landwirtschaftlicher Nutzung in unfruchtbares Ödland. Dessen Wiederaufforstung wäre sehr aufwändig und kostspielig. Und auf natürliche Weise regenerieren sich die Wälder nur sehr langsam, weil die kahlen, offenen Flächen keine Deckung für Samenausbreiter wie Vögel und Kleintiere bieten. Jetzt zeigte sich bei einer Langzeitstudie in Costa Rica allerdings, dass Fledermäuse die Wiederbewaldung stark beschleunigen können.

Detlev Kelm vom Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung in Berlin und Kerstin Wiesner von der Universität Erlangen-Nürnberg stellten auf gerodeten Flächen Nistkästen für die fliegenden Säuger auf. Diese ähneln hohlen Baumstämmen, den natürlichen Behausungen der Fledermäuse. Die Tiere nahmen die neuen Wohnstätten gerne in Besitz und verteilten durch ihre Ausscheidungen zahlreiche Pflanzensamen in der Umgebung. Mehr als 60 verschiedene Pflanzenspezies siedelten sich so auf den kahlen Flächen an – darunter auch viele Pionierarten, die das erste Stadium der Bewaldung bilden.

Die Nistkästen lassen sich kostengünstig herstellen und über Jahre hinweg nutzen. Die von Kelm und Wiesner entwickelte Methode könnte daher eine billige Möglichkeit bieten, verloren gegangenen Regenwald zurückzugewinnen.

Conservation Biology, Online-Vorabveröffentlichung

Die Langzungenfledermaus ernährt sich von Früchten tropischer Bäume und verteilt die Pflanzensamen mit ihrem Kot.

DETLEV KELM, IZW

ungewöhnliche Ruhe. Durch Inaktivierung dieser Regionen schützen sich die Tiere nach Ansicht der Wissenschaftler vor dem Dauerstress, dem sie in der Gruppe ausgesetzt sind. Nach dem Umzug in den fremden Käfig verstärkte sich der Effekt sogar noch: Die Hirnaktivität in den genannten Bereichen sank weiter. Bei dominanten Tieren verhielt es sich umgekehrt. Vor allem das Belohnungssystem wurde in der Stresssituation erregt.

Pressemitteilung der Wake Forest University

Rangniedere Javaneraffen erwiesen sich unter Stress als anfälliger für Drogen. Das Metallhalsband mit Griffen erleichterte bei den Versuchen die Handhabung der Tiere.

MARK WRIGHT, WFU/BMC

ARCHÄOLOGIE

Ältestes Schmuckstück Amerikas

■ In den alten Andenkulturen prunkten die Reichen und Mächtigen mit edlem Schmuck aus Gold, den sie etwa während ritueller Zeremonien zur Schau stellten. Doch wann begann die Anfertigung der wertvollen Statussymbole? Bislang datierten die ältesten bekannten Exemplare aus dem 15. vorchristlichen Jahrhundert. Doch eine neue Entdeckung zeigt: Die Anfänge der Goldschmiedekunst in Südamerika reichen noch viel weiter zurück.

In einem Grab bei Jiskairumoko südwestlich des Titicacasees im heutigen Peru stießen Forscher um Mark Aldenderfer von der University of Arizona in Tucson auf neun zylinderförmige Goldröhrchen. Im Wechsel mit türkisfarben schimmernden Steinchen, vermutlich Sodalith, lagen sie kreisförmig – wie mit einem inzwischen zerfallenen Band zu einer Kette aufgefädelt – nahe dem Unterkiefer eines Erwachsenen unbekannten Geschlechts. Die Spuren an der Oberfläche der Zylinder deuten an, dass das Gold kalt gehämmert worden war. Das mittlere Röhrchen fasste zudem ein weiteres Sodalith-Steinchen.

Laut Radiokarbondatierung der Skelettreste wurde der Leichnam zwischen dem 20. und 22. vorchristlichen Jahrhundert bestattet – zu einer Zeit, als die frühen Andenbewohner gerade erst zu einer sesshaften Lebensweise übergingen. Das widerspricht der bisherigen Annahme, dass die Herstellung von Goldschmuck in Südamerika an den Aufstieg der Hochkulturen mit ihren wohlhabenden Eliten gekoppelt war.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

So sieht der älteste Goldschmuck Südamerikas aus.

MARK ALDENDERFER, UNIVERSITY OF ARIZONA / PNAS

NEUROWISSENSCHAFT

Hallo Nachbar!

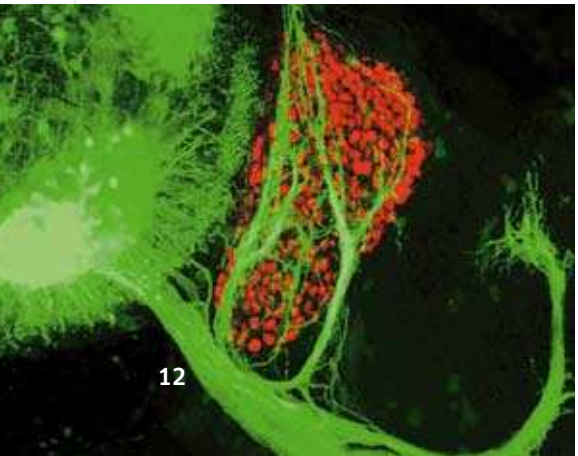
■ Zwischen Rückenmark und Muskeln verlaufen die Axone von Nervenzellen in Bündeln, die benachbart, aber streng nach Funktion getrennt sind: In den einen flitzen die Befehle der Motoneuronen zum Muskel, während in den anderen sensorische Signale in entgegengesetzter Richtung zum Rückenmark eilen. US-Forscher haben jetzt Hinweise darauf gefunden, wie es während der Embryonalentwicklung zu dieser säuberlichen Aufteilung kommt. Verantwortlich sind demzufolge unter anderem zwei Typen von Rezeptoren, die sich auf den Spitzen der wachsenden Axone befinden: EphA3 und EphA4. Sie reagieren auf Proteine – so genannte Ephrine – an der Oberfläche benachbarter Zellen und sorgen so dafür, dass Fasern vom gleichen Typ einander suchen, aber Abstand zu denjenigen vom anderen Typ halten.

Den Beweis lieferte das Team um Benjamin Gallarda vom Salk Institute in Kalifornien, indem es Mäuse züchtete, bei denen die Gene für EphA3 und EphA4 ausgeschaltet waren. Das Ergebnis war Chaos: Die Axone der Motoneuronen kamen vom Weg ab, wuchsen zwischen die sensorischen Fasern und kehrten teils sogar zum Rückenmark zurück.

Das chemische Signalsystem leitet aber nicht nur während der Embryonalentwicklung die Nervenfortsätze zu ihren Zielen, sondern verhindert auch, dass sich nach Rückenmarksverletzungen beschädigte Neurone regenerieren. Die neuen Erkenntnisse könnten helfen, diese Blockade zu überwinden.

Science, Bd. 320, S. 233

Axone auf Abwegen: Deaktiviert man bei Mäusen die Rezeptoren EphA3 und EphA4, dringen die Axone von Motoneuronen (grün) in Bereiche mit sensorischen Fasern (rot) ein, von denen sie normalerweise streng getrennt sind.



B. W. GALLARDA UND S. E. ANDREWS, SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES

ROBOTIK

Laserpointer dirigiert Robo-Butler

■ Roboter zu bauen, die auf Zuruf Aufgaben erledigen, scheitert gewöhnlich schon daran, dass selbst die leistungsstärksten Computer mit verbaler Kommunikation überfordert sind. Forscher vom Georgia Institute of Technology und der Emory University in Atlanta umgehen diese Schwierigkeit nun mit der einfachsten aller Gesten: dem Fingerzeig. Als Finger verwendet das Team um Charlie Kemp einen grünen Laserpointer. Sein auf Rädern fahrender Roboter namens El-E (gesprochen: Elli) apportiert automatisch jedes Objekt, auf dem der Lichtpunkt erscheint. Dadurch muss er nicht aufwändig lernen, Gegenstände zu identifizieren und zu benennen.

Projektleiter Charlie Kemp lässt sich von dem Roboter El-E ein Tuch reichen.

CHARLIE KEMP, HSI, GEORGIA TECH

Doch auch so ist die Aufgabe anspruchsvoll genug. Mit einer Kamera unterscheidet der Roboter das gesuchte Objekt von der Unterlage und packt es mit seinem rüsselartigen Greifer. Dann bringt er es an die Stelle, die ihm per Laserpointer angezeigt wird. In der Nähe des Lichtflecks sucht El-E eine ebene Fläche oder eine Person, erkennbar am Gesicht. Einem Menschen präsentiert er den Gegenstand in Griffweite; anderenfalls stellt er das Objekt auf der nächsten glatten Oberfläche ab.

Ziel der Forschung ist die Entwicklung einer mechanischen Haushaltshilfe, die Patienten mit stark eingeschränkter Beweglichkeit im Alltag unterstützen soll. Die Wissenschaftler arbeiten mit Medizinern und Patienten mit der degenerativen Nervenerkrankung ALS (Amyotrophe Lateralsklerose) zusammen, um ihre Kreation praxistauglich zu machen. Als Nächstes soll El-E lernen, Lichtschalter und Türgriffe zu identifizieren und zu bedienen.

Pressemitteilung des Georgia Institute of Technology

PSYCHOLOGIE

Hormongesteuerte Finanzjongleure

■ Börsenmakler handeln keineswegs immer rational – vor allem in Ausnahmesituationen wie bei plötzlichen Kurseinbrüchen oder anschwellenden Spekulationsblasen verhalten sie sich mitunter tollkühn. Dabei hängt das Ausmaß ihrer Risikobereitschaft auch von ihren Hormonen ab. Das haben Forscher um John Coates von der University of Cambridge nun herausgefunden.

An acht aufeinander folgenden Arbeitstagen baten die Wissenschaftler 17 männliche Börsenhändler auf dem Londoner Parkett jeweils vor und nach der Hauptgeschäftszeit zur Speichelprobe. Alle Studienteilnehmer mussten zudem ihre am Tag erzielten Gewinne und Verluste offenlegen. Der Vergleich mit ihren zuvor erbrachten mittleren monatlichen Leistungen ermöglichte Rückschlüsse auf ihren aktuellen Erfolg.

Demnach machten Makler mit hohem Testosteronspiegel überdurchschnittliche Gewinne – besonders dann, wenn ihre Werte morgens bereits erhöht waren. Als Grund vermuten die Forscher, dass das Hormon bei den Händlern ähnlich wie bei Sportlern die Risikobereitschaft steigert. Das wirkt sich auf dem Börsenparkett unter normalen Umständen positiv aus. In kritischen Marktlagen und bei dauerhaft erhöhten Werten verleitet es aber zu Leichtsinn, was zu großen Verlusten führen kann.

Wie die Forscher außerdem herausfanden, nahm bei starken Kursschwankungen der Cortisolspiegel zu. Dieses Hormon dämpft die Risikobereitschaft, so dass eine erhöhte Konzentration die Makler bei unsicherer Marktlage vor schlechten Geschäften bewahren könnte.

PNAS, Bd. 1051, S. 6167

Den Markt im Blick: Doch nicht nur die Fakten zählen, Börsenhändler sind auch Spielball ihrer Hormone.

JOE HERBERT, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Mitarbeit: L. Fischer, M. Jessl und C. Marty

Tanne im Nanowald

Komplexe Strukturen mit hierarchisch gegliederten Elementen gelten als Rückgrat der künftigen Nanotechnik, lassen sich aber nur schwer herstellen. Umso mehr erstaunt, dass diese winzige Tanne aus dem Halbleiter Bleisulfid, die Matthew Bierman und Kollegen von der University of Wisconsin in Madison erzeugt haben, ganz von selbst durch chemische Dampfabscheidung aus der Gasphase gewachsen ist. Ihre Form verdankt sie einer so genannten Schraubenversetzung im Innern des Stamms. Er wächst dadurch schneller als die Seitenäste. Auch deren schraubenförmige Anordnung ist eine Folge des Kristalldefekts.

10 Mikrometer

MATTHEW J. BIERMAN, UNIVERSITY OF WISCONSIN / SCIENCE

QUANTENPHYSIK Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Verschränkung zweier Spiegel

Zunehmend bemühen sich Forscher, die paradoxen Phänomene der Quantenwelt auch im Makrokosmos nachzuweisen. Nach neuesten Berechnungen sollten sich sogar zwei kilogrammschwere Spiegel derart miteinander verschränken lassen, dass sie eine quantenmechanische Einheit bilden.

Von Roman Schnabel

In der Welt der kleinsten Teilchen gelten ungewohnte, zum Teil paradoxe Regeln. So ist es möglich, dass Quantenobjekte gleichzeitig in zwei Zuständen existieren, die einander im Grunde ausschließen. Außerdem können sie derart miteinander verschränkt werden, dass sie sich trotz räumlicher Trennung wie ein zusammenhängendes Gebilde verhalten. Eine Manipulation an dem einen scheint dann die Eigenschaften seines beliebig weit entfernten Partners zu beeinflussen.

In unserer vertrauten Alltagswelt ist von solchen »spukhaften Fernwirkungen«, wie Einstein sie nannte, nichts zu spüren. Viele Physiker halten es jedoch für möglich, dass sich Quanteneffekte unter bestimmten Bedingungen auch im Makrokosmos beobachten und nachweisen lassen. Meine Kollegen und ich von der Universität Hannover und vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm und Hannover haben nun ein Experiment zur Verschränkung von zwei kilogrammschweren Spiegeln vorgeschlagen, das unseren Berechnungen zufolge machbar sein sollte.

Das Besondere an verschränkten Objekten möchte ich an zwei fiktiven Würfeln deutlich machen. Beide sollen ungezinkt sein, also rein zufällige, nicht vorhersagbare Augenzahlen liefern. Zwei Personen nehmen nun jeweils einen davon und gehen in unterschiedliche Räume. Dort würfeln sie zu vereinbarten Zeiten, zum Beispiel alle fünf Sekunden, immer wieder und notieren die Augenzahl. Am Abend vergleichen sie dann ihre Notizen.

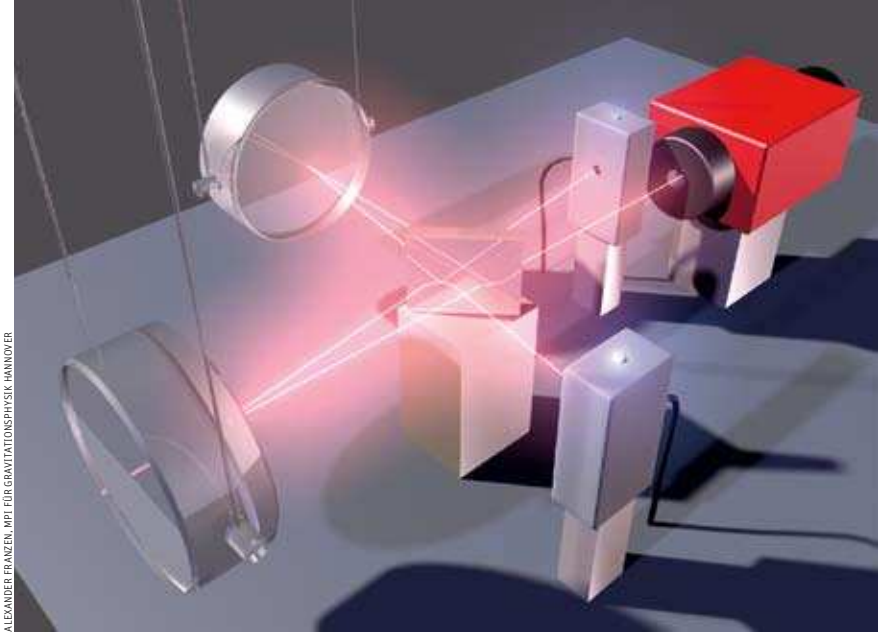
Waren die Würfel verschränkt, wird sich dabei herausstellen, dass die erhaltenen Zahlenkolonnen zwar in völlig zufälliger Art und Weise variieren, aber miteinander identisch sind (Bild unten). Die quantentheoretische Erklärung dafür lautet: Die Würfel lassen sich nicht als unabhängige, individuelle Objekte betrachten, sondern bilden eine Einheit.

Verschränkung tritt oft bei Teilchen auf, die einen gemeinsamen Ursprung haben. Man kann sie aber auch nachträglich erzeugen, indem man zwei Objekte einer gemeinsamen Kraft aussetzt und sie so in eine starke gegenseitige Abhängigkeit bringt. Nach einer gewissen Zeit tritt dann die Verbindung zur Umgebung in den Hintergrund: Die Gegenstände beginnen ihre Individualität einzubüßen und eine neue Einheit zu bilden. Diese Einheit bleibt auch erhalten, wenn man die auf beide wirkende Kraft abstellt – zumindest so lange, bis der Einfluss der Umgebung wieder dominiert. Genau dieses Prinzip bildet die Grundlage unseres Vorschlags, zwei Spiegel miteinander zu verschränken *(»Physical Review Letters«, Bd. 100, S. 013601)*.

Damit Störungen aus der Umgebung möglichst gering bleiben, soll das Experiment auf einer schwingungsarmen

ALEXANDER FRANZEN, MPI F. GRAVITATIONSPHYSIK HANNOVER

Zwei verschränkte Würfel würden immer die gleiche Augenzahl zeigen – unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind. Das Erstaunliche dabei: Es gibt weder Kräfte zwischen den Würfeln, noch wird Information ausgetauscht.



ALEXANDER FRANZEN, MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK HANNOVER

Mit diesem experimentellen Aufbau soll es gelingen, über den Lichtdruck von Laserphotonen die Bewegungen der beiden aufgehängten Spiegel zu verschränken, so dass sie eine quantenmechanische Einheit bilden. Zum Nachweis dienen zwei Photodetektoren, die das Interferenzmuster der reflektierten Strahlen registrieren.

Plattform stattfinden, die in einem Hochvakuum an dünnen Fasern aufgehängt wird. Auf ihr sind ein Laser sowie ein halbdurchlässiges Strahlteilerfenster angebracht. Die beiden Spiegel hängen an dünnen Fasern über der Plattform (Bild oben). Wegen der pendelartigen Konstruktion können sie mit Perioden von einigen Sekunden hin- und herschwingen. Aber auf kurzen Zeitskalen von, sagen wir, einer hundertstel Sekunde spielen die rücktreibenden Kräfte der Pendel keine Rolle und die Spiegel verhalten sich in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlen wie frei schwebende Objekte. Auf diesen Zeitskalen lassen sich nach unseren Berechnungen die Orte und Impulse der beiden Spiegelschwerpunkte miteinander verschränken.

Synchron und asynchron zugleich

Die gemeinsame Kraft, die für die quantenmechanische Kopplung sorgt, stammt vom Lichtdruck eines Laserstrahls, den der Strahlteiler gleichmäßig in zwei Teilstrahlen aufspaltet. Die Spiegel werden so ausgerichtet, dass sie das auf sie fallende Licht zurückwerfen. Da sie wegen der heisenbergschen Unschärferelation prinzipiell nicht völlig zur Ruhe kommen können, bewegen sie sich zu Anfang des Versuchs bereits ein wenig, jedoch völlig unabhängig voneinander.

Sobald der Laser eingeschaltet ist, prasseln die Photonen, aus denen sein Strahl besteht, in einer unregelmäßigen, zufälligen Folge auf beide Spiegel. Deren Bewegung wird dadurch schon nach wenigen tausendstel Sekunden komplett vom Impuls der Lichtteilchen bestimmt, und jede Erinnerung an das, was davor war, geht verloren. Ist der Einfluss der Umgebung genügend unterdrückt, so werden genau in diesem Moment die Spiegel miteinander verschränkt.

Aber wie lässt sich das nachweisen? Eine Möglichkeit dazu bieten die beiden Laserstrahlen. Denn sie verändern nicht nur die Spiegelbewegungen, sondern werden umgekehrt auch von ihnen beeinflusst. Ein zuvor ausgelenkter Spiegel reflektiert die auftreffenden Photonen nämlich etwas später. Das reflektierte Licht enthält also Informationen über seine Bewegung.

Für den Nachweis der Verschränkung braucht man allerdings Kenntnisse über die Relativbewegung der beiden Spiegel. Dazu kann ein einfacher Trick verhelfen: Man lässt die reflektierten Laserstrahlen auf exakt den gleichen Punkt am Strahlteiler treffen, so dass sie miteinander interferieren. Dabei entstehen zwei neue Strahlen, welche die gewünschten Informationen liefern, wenn sie mit unterschiedlichen photoelektrischen Detektoren analysiert werden.

Der eine ist so konstruiert, dass er Auskunft darüber gibt, wie stark die Impulse (und damit auch die Geschwindigkeiten) der Spiegel in Richtung Strahlteiler differieren. Bei erfolgreicher Verschränkung sollten sie nämlich jederzeit exakt übereinstimmen: Wenn sich ein Spiegel in einem Moment gerade mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Strahlteiler entfernt, tut das auch der zweite mit genau derselben Geschwindigkeit, und umgekehrt.

Der andere Detektor misst dagegen die Summe der Spiegelabstände zum Strahlteiler. Sie sollte, wenn die Spiegel verschränkt sind, konstant bleiben: Entfernt sich ein Spiegel etwas vom Strahlteiler, so nähert sich ihm der andere um exakt den gleichen Wert an.

Tatsächlich handelt es sich dabei also um eine paradoxe Situation: Laut Impulsmessung bewegen sich die beiden Spiegel synchron, laut Ortsmessung dagegen asynchron – ein für uns unvorstellbarer Sachverhalt! Genau dieser Widerspruch liefert aber laut Quantenphysik den Beweis für die Verschränkung. Wenn sich die Spiegel nämlich zur selben Zeit präzise sowohl synchron wie asynchron bewegen, zeigen sie damit an, dass sie zu einer quantenmechanischen Einheit verschmolzen sind. Beide für sich genommen verletzen dabei scheinbar die heisenbergsche Unschärferelation.

Im Prinzip sollte sich die Verschränkung auch mit einer separaten Apparatur feststellen lassen. Dazu bräuchte man zwei Paare von Messgeräten, die unabhängig voneinander entweder exakt die Geschwindigkeiten oder die Orte der Spiegel relativ zur Plattform bestimmen. In beiden Fällen bestünde das Ergebnis wie bei den fiktiven verschränkten Würfeln aus zwei unvorhersagbaren Zahlenkolonnen, die aber synchron (beziehungsweise asynchron) zueinander variieren.

Nach Sekundenbruchteilen würde sich die Korrelation etwas verschieben, weil Störungen aus der Umgebung sich aufsummieren. Betrachtet man aber in jedem Moment nur den Zeitabschnitt unmittelbar davor, sieht man, dass die Verschränkung permanent vorhanden ist. Mit dieser Apparatur wäre die quantenmechanische Kopplung auch noch für eine kurze Zeit – wenige Millisekunden – nach dem Abschalten des Lasers feststellbar. Derzeit überlegen wir, wie sich dieser Nachweis praktisch realisieren lässt.

Zugegeben: Unser vorgeschlagenes Experiment stellt enorme Anforderungen an die apparative Ausrüstung. Voraussetzung ist ein hochstabiler Laserstrahl, in dem die zeitliche Variation der Photonen nur von der Quantentheorie bestimmt ist und nicht von Vibrationen oder Temperaturschwankungen des Laserkristalls.

Die Spiegel können bis zu einem Kilogramm wiegen, sollten aber nach Möglichkeit aus einem einzelnen (synthetischen) Kristall gefertigt sein, damit sich die braunsche Bewegung der Spiegelatome nicht bemerkbar macht. Vermutlich muss man sie außerdem auf extrem tiefe Temperaturen von nur wenigen Kelvin abkühlen, um sämtliche inneren Bewegungen, die ihre Schwerpunkte im Vergleich zu ihren Oberflächen verschieben, zu minimieren.

So hoch diese Anforderungen an das Experiment sind, sollten sie sich mit dem heutigen Stand der Technik doch erfüllen lassen. Wir sehen deshalb gute Chancen, dass verschränkte Spiegel schon bald Realität sein werden und sich die Paradoxien der Quantenwelt auch in unserem makroskopischen Alltag demonstrieren lassen.

Roman Schnabel ist Professor am Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) der Universität Hannover.

GENETIK 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

DNA wie einen Strichkode lesen

Die Entzifferung kompletter Genome ist trotz aller Fortschritte noch aufwändig und teuer. Doch ein neues Verfahren könnte die DNA-Sequenzierung so einfach machen wie das Scannen von Strichkodes an Supermarktkassen.

Von Thorsten Braun

Die menschliche DNA besteht aus 3,08 Milliarden Basenpaaren, aufgereiht in einem Abstand von nur 0,34 Nanometern. Lange Zeit galt es als unmöglich, ihre genaue Abfolge vollständig zu bestimmen. Doch in einem beispiellosen Kraftakt lösten rund tausend Wissenschaftler aus 40 Ländern diese Aufgabe. Von 1990 bis 2003 erstellten sie im Rahmen des Humangenomprojekts eine Landkarte des menschlichen Erbguts.

Schon vorher waren – quasi als Fingerübung – einzelne einfache Genome entziffert worden. Im Verlauf des Mammutprojekts konnten die Forscher die Sequenzierungstechnik so perfektionieren, dass sich danach in rascher Folge die komplette Erbinformation von immer mehr Lebewesen entschlüsseln ließ. Inzwischen nehmen Wissenschaftler sogar den individuellen DNA-Kode einzelner Menschen ins Visier, um deren persönliches Krankheitsrisiko voraussagen zu können.

Noch verhindern hohe Kosten zwar das routinemäßige Sequenzieren im medizinischen Alltag, da sehr aufwändige Analyseverfahren dafür nötig sind. Doch das könnte sich mit einer neuen Methode ändern, die Volkert Deckert und Elena Bailo vom Institute for Analytical Sciences (ISAS) in Dortmund entwickelt haben *(»Angewandte Chemie«, Bd. 120, S. 1682)*. Mit einer Kombination von Raman-Spektroskopie und Rasterkraftmikroskopie soll es dabei gelingen, die Reihenfolge der Basen auf dem Erbgutstrang direkt abzulesen.

Vorerst machten Deckert und Bailo ihre Experimente allerdings mit RNA statt DNA; denn sie liegt im Unterschied zur Doppelhelix der normalen Erbsubstanz von Natur aus schon als Einzelstrang vor. In der Zelle fungiert sie als Zwischenträger für die genetische Information und ist analog zur DNA aufgebaut: An einem Rückgrat aus miteinander verknüpften Phosphatresten sitzen wie Perlen so genannte Nukleoside. Sie bestehen aus dem Zucker Ribose (Desoxyribose bei der DNA) und einer der organischen Basen Adenin, Cytosin, Guanin oder Uracil (Thymin bei der DNA). Der Einfachheit halber verwendeten die beiden Forscher für ihre Experimente RNA, die nur Cytosin als Base enthielt.

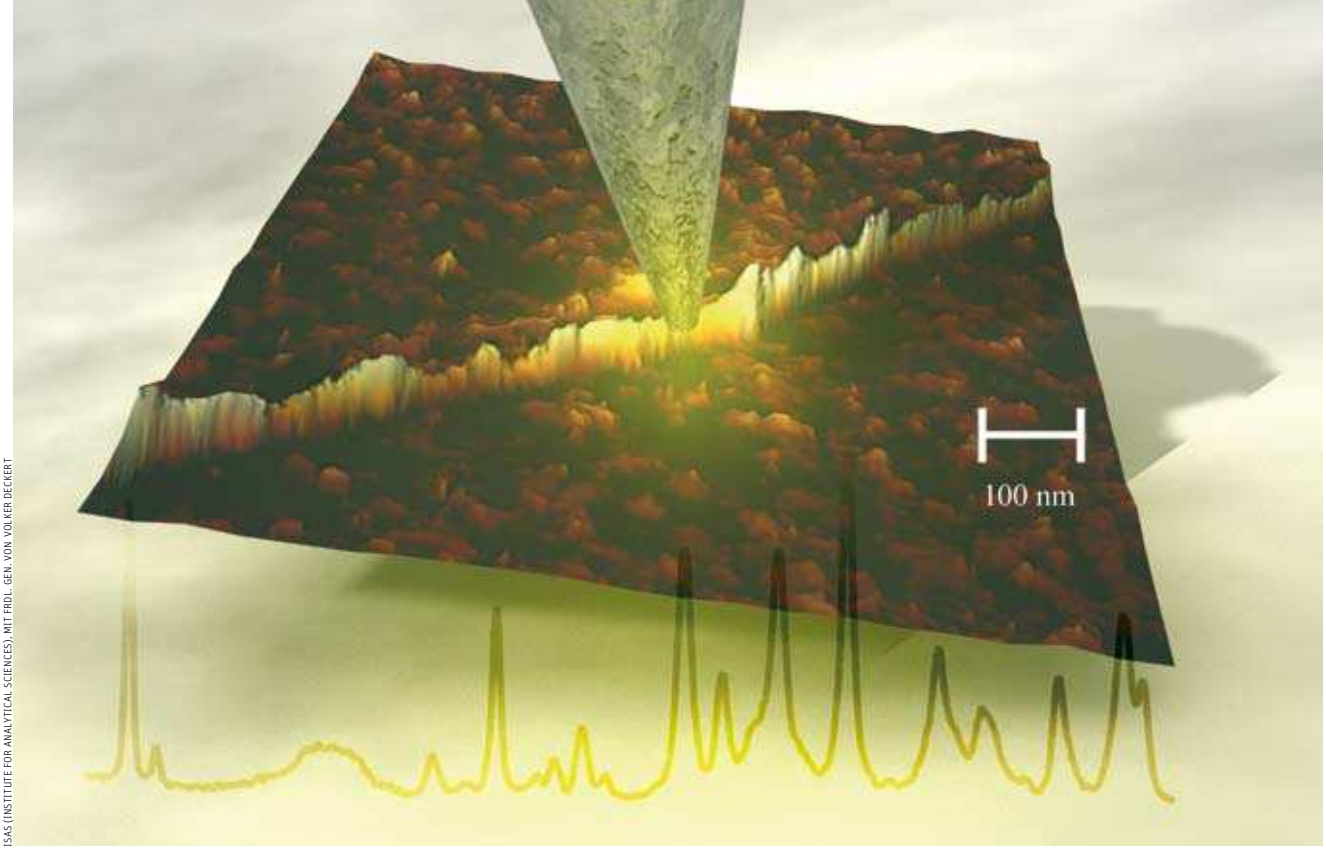
Abtasten des Basenstrangs mit der Nadel

Die erste Schwierigkeit war, einen linear ausgerichteten RNA-Strang zu erhalten. Normalerweise neigt das Molekül nämlich dazu, sich zu verknäueln. Um dem entgegenzuwirken, nahmen die Forscher die RNA mit einer speziellen Lösung auf, die sie dann auf den Probenträger des Rasterkraftmikroskops tropften. Dieser besteht aus Glimmer, einem durchsichtigen Schichtsilikat. Dadurch hat er nicht nur eine extrem glatte Oberfläche, sondern bindet auch die Phospatgruppen der RNA-Stränge an sich, so dass alle Basen nach oben zeigen.

Deckert schätzt, dass sich auf dem Träger mehrere 100 000 RNA-Stränge befanden, die jeweils rund 400 Cytosingruppen enthielten. »Um einen einzelnen Strang zu identifizieren, haben wir mit dem Rasterkraftmikroskop von einem rund zehn Quadratmikrometer großen Areal eine Aufnahme gemacht«, berichtet Deckert, der am ISAS den Fachbereich Proteomics leitet.

Zwischen der winzigen Nadelspitze des Mikroskops und der Oberfläche wirken atomare Kräfte. Durch das punktweise Aufzeichnen dieser Kräfte lässt sich wie bei einem Digitalfoto eine Abbildung der Probenoberfläche erzeugen. »RNA-Stränge erheben sich rund einen Nanometer über die Glimmeroberfläche«, erläutert Deckert, »und lassen sich deshalb gut auf einem solchen Foto erkennen.« Unter ihnen suchten die Forscher ein halbwegs geradliniges Exemplar aus.

Sobald Position und Verlauf eines RNA-Strangs bekannt sind, kann die Nadelspitze Base für Base an ihm entlanggeführt werden. Aber damit lässt sich deren chemische Identität noch nicht bestimmen. Dazu bedarf es zusätzlich eines Lasers, der auf das Areal gerichtet ist, in dem sich der RNA-Strang befindet. Sein Licht tritt in Wechselwirkung mit den Cytosinmolekülen, die



ISAS (INSTITUTE FOR ANALYTICAL SCIENCES), MIT FRDL. GEN. VON VOLKER DECKERT

Während die Spitze des Rasterkraftmikroskops einen RNA-Strang entlangfährt, wird sie von einem Laserstrahl beleuchtet und ein Raman-Spektrum (gelbe Kurve) aufgenommen. Aus ihm lässt sich die Abfolge der Bausteine des RNA-Strangs entnehmen.

sich direkt unter der Nadelspitze befinden, und wird in alle Richtungen gestreut.

Das Streulicht lässt sich mit einem Spektrometer analysieren. Es enthält neben der Hauptspektrallinie, die vom eingestrahlten Licht selbst stammt, weitere Banden mit einer größeren Wellenlänge. Sie entstehen, wenn die Photonen auf die Cytosinmoleküle treffen und sie in Schwingung versetzen, indem sie einen Teil ihrer Energie auf sie übertragen. Die gestreuten Lichtquanten sind dann um diesen Energiebetrag ärmer und entsprechend langwelliger. Der Vorgang wird als Ramanstreuung bezeichnet. Sie ist unabhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts und charakteristisch für das betreffende Molekül.

Raffinierte Spitzentechnik

Deckert schätzt, dass unter der Spitze, die einen Durchmesser von rund 20 Nanometern hat, ungefähr 50 Basen Platz haben. Um ein Ramanspektrum zu erhalten, wäre normalerweise eine viel größere Anzahl von Molekülen erforderlich. Doch die Dortmunder Forscher fanden einen eleganten Ausweg aus diesem Dilemma. Seit einigen Jahren ist bekannt, dass raue Oberflächen aus Metallen wie Gold, Silber oder Kupfer den Ramaneffekt extrem verstärken können. Deshalb beschichteten Deckert und Bailo die Nadelspitze des Rasterkraftmikroskops mit Silber. Das einfallende Licht regt in der Metalloberfläche freie Elektronen kollektiv an und erzeugt so ein starkes elektromagnetisches Feld. Es interagiert mit den Cytosinmolekülen unter der Nadelspitze und verstärkt deren Ramanstreuung um den Faktor 10^8, also hundertmillionenfach.

Die beiden Wissenschaftler nahmen von mehreren Positionen auf dem RNA-Strang ein Spektrum auf. Die erhaltenen Spektrallinien zeigten jedes Mal das für Cytosin typische Muster und hatten eine ähnliche Intensität.

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu bestimmen, rückten Deckert und Bailo die Nadelspitze mehrere hundert Nanometer vom RNA-Strang weg. Obwohl der Laser diesen nach wie vor anregte, konnte der Detektor außer einem unspezifischen Rauschen nichts messen. Die Signalintensität war mindestens 200-mal schwächer als zuvor. »Das bedeutet, dass der Beitrag jedes einzelnen der rund 50 Cytosinmoleküle zum Gesamtsignal viermal so groß wie das Rauschen ist«, erklärt Deckert.

Das ist eine wichtige Voraussetzung, um die Abfolge einzelner Basen in einem Strang zu bestimmen. Enthält die RNA sämtliche vier Basen, so setzt sich das Spektrum aus den Spektrallinien von ihnen allen zusammen. Deren relative Stärke hängt davon ab, aus wie vielen einzelnen Adenin-, Cytosin-, Guanin- und Uracilmolekülen das RNA-Stück unter der Nadelspitze des Rastermikroskops besteht. »Führt man nun die Spitze um eine Base auf dem Strang weiter«, erläutert Deckert, »wobei zum Beispiel ein Guanin dazukommt und ein Cytosin wegfällt, verstärken sich die für Guanin charakteristischen Spektrallinien und diejenigen für Cytosin schwächen sich ab. So kann man Base für Base die Sequenz ablesen.«

Momentan testen die beiden Forscher die spitzenverstärkte Ramanspektroskopie (TERS; nach englisch *tip-enhanced Raman spectroscopy*) an DNA-Strängen, die alle vier Basen enthalten. Deckert rechnet damit, dass die Versuche dieses Jahr beendet werden. Sind sie erfolgreich, möchte er mit Mikroskopherstellern in Kontakt treten. Mit deren Hilfe soll TERS zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt werden. »Noch ist es ein experimentelles Verfahren, aber es könnte die DNA-Sequenzierung ganz einfach machen«, schwärmt Deckert, »so einfach, als ob man einen Strichkode an der Supermarktkasse abliest.«

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.
6. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie
7. den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com
oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Die 7 größten Rätsel der Wissenschaft«
Erfrischend einfach und lebendig erklären David und Arnold Brody die sieben Pfeiler der Naturwissenschaften.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Technaxx DVB-T-Stick S3.
Der DVB-T-Stick S3 sorgt für hervorragende Bilder und eine hohe Auflösung. Mit EPG-Programmführer, USB-2.0-High-Speed-Verbindung, Kanalvorschau, Videotext und zeitgesteuerter Aufnahme.Lieferumfang: Antenne, Fernbedienung, Treiber und Software

Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

WERKSTOFFKUNDE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Selbstheilendes Gummi

Es klingt wie ein Wunder, doch nach dem Zerschneiden dieses neuartigen, elastischen Materials muss man nur die Enden zusammendrücken, damit es wieder hält.

Von Michael Groß

Vor 170 Jahren erfand Charles Goodyear die Vulkanisation des Kautschuks zur Herstellung von Gummi. Er ging rein empirisch vor und probierte verschiedene Arten der Bearbeitung. So fand er heraus, dass durch Erhitzen des Naturstoffs mit Schwefel jenes sehr haltbare, hochelastische Material entsteht, aus dem heute noch Autoreifen und Gummiringe hergestellt werden. Bisher ist es nicht gelungen, sein Rezept mit den Mitteln der modernen Wissenschaft entscheidend zu verbessern. Um dem erprobten Werkstoff zusätzliche Vorzüge zu verleihen, haben ihn Materialforscher an der Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles in Paris deshalb nun kurzerhand neu erfunden.

Herkömmliches Gummi besteht aus langen Kettenmolekülen, die beim Vulkanisieren durch kovalente chemische Bindungen miteinander quervernetzt werden. Der neuartige Werkstoff, den Ludwik Leibler und seine Mitarbeiter konzipiert haben, enthält zwar ebenfalls lange, quervernetzte Ketten. Doch sind die Verknüpfungen zwischen ihnen wie auch zwischen den einzelnen Kettengliedern leicht aufzulösen und umzuordnen. Es handelt sich nämlich nicht um kovalente chemische Bindungen, sondern um Wasserstoffbrücken, die letztlich auf elektrostatischen Dipol-Wechselwirkungen beruhen.

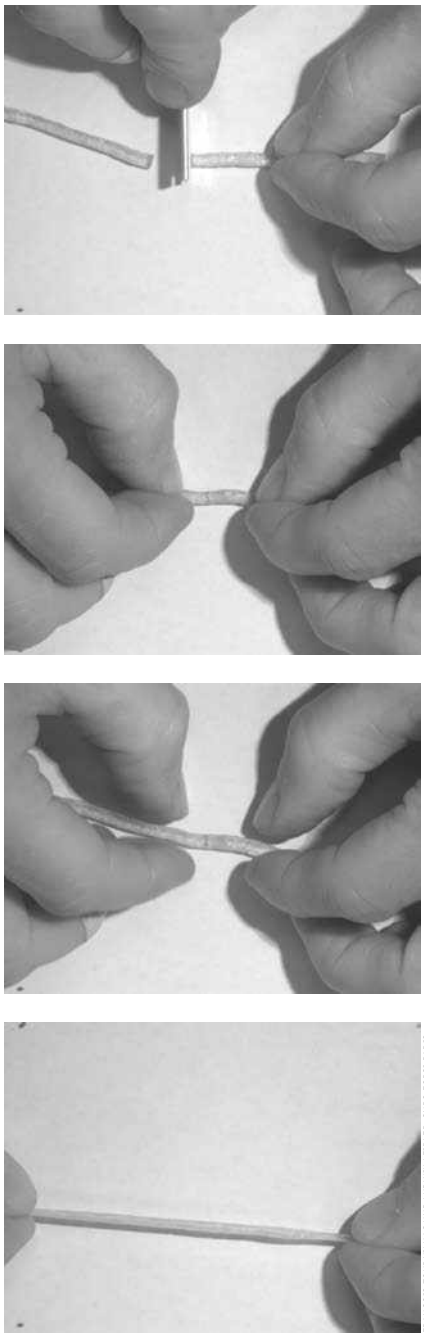
Zum Aufbau dieser molekularen Netzwerke gingen die Pariser Forscher von Karbonsäuren mit zwei oder drei Karboxylgruppen (–COOH) aus. Sie dienen als lineare Kettenglieder beziehungsweise als Bausteine für Verzweigungen. An die Karboxylgruppen knüpften Leibler und seine Kollegen mittels einer so genannten Kondensationsreaktion – durch die sich auch Aminosäuren unter Abspaltung von Wasser zu Proteinketten aufreihen – stickstoffhaltige organische Moleküle, die von Harnstoff oder Imidazol abgeleitet waren. Sie enthalten sowohl Donorgruppen, die ein teilweise positiv geladenes Wasserstoffatom als Brückenkopf zur Verfügung stellen (etwa –OH, $-NH_2$), als auch Akzeptoren mit partiell negativer Ladung, die mit diesem Atom wechselwirken können (wie =O). Alle verwendeten Substanzen sind gängige, kostengünstige und leicht handhabbare Chemikalien, die bereits im industriellen Maßstab hergestellt und eingesetzt werden.

Treue der Moleküle zum ehemaligen Bindungspartner

Im ersten Anlauf entstand ein spröder, glasartiger Kunststoff, der sich erst bei Temperaturen um 90 Grad Celsius gummiartig verhielt. Um ihn auch bei niedrigeren Temperaturen dehnbar zu machen, »verdünnten« ihn die Forscher mit geringen Mengen des Lösungsmittels Dodekan (ein Kohlenwasserstoff mit zwölf Kohlenstoffatomen, der zum Beispiel im Dieselkraftstoff vorkommt).

Diese nachgebesserte Substanz, welche die Forscher bisher einfach »Material B« nennen, erwies sich als ebenso dehnbar und elastisch wie herkömmliches Gummi *(»Nature«, Bd. 451, S. 977)*. Es zeichnet sich jedoch gegenüber dem vertrauten Werkstoff durch eine fast unglaubliche Eigenschaft aus: Wenn man ein Gummiband aus Material B durchschneidet oder zerreißt, lassen sich die beiden Teile bei Raumtemperatur einfach wieder miteinander verbinden – man muss sie nur mit den Enden einige Minuten aneinanderpressen. Der Bruch verheilt, ohne eine Schwachstelle zu hinterlassen, und das Material kann an derselben Stelle beliebig oft zertrennt und wieder zusammengefügt werden, ohne dass diese Behandlung bleibende Spuren hinterlässt.

Das Geheimnis der fast magischen Selbstheilungskraft liegt – Sie ahnen es vielleicht – in den Wasserstoffbrückenbindungen: jenen relativ schwachen, aber zahlreichen Wechselwirkungen, die zum Beispiel auch die DNA-Doppelhelix und die Beta-Faltblätter der Proteine zusammenhalten. Beim Zerschneiden von Material B werden einige davon ge-



FRANÇOIS TOURNILHAC UND LUDWIK LEIBLER, CNRS-ESPCI PARIS

Kein Zaubertrick: Ein durchgeschnittener Strang aus einem neuartigen Gummimaterial lässt sich durch einfaches Zusammendrücken der beiden Enden wieder verbinden. Nach nur einer Stunde ist die Schnittstelle verheilt und hält so fest, als sei nichts gewesen.

kappt, doch die ehemaligen Bindungspartner bleiben kurzfristig (für einige Stunden) bindungsbereit und finden wieder zueinander, wenn man die Fragmente zusammenpresst. Erst im Verlauf von Tagen geht die Bindungsfähigkeit der Schnittstelle verloren, da sich die allein gelassenen Moleküle innerhalb des Fragments dann neu arrangieren und andere Wasserstoffbrücken ausbilden.

Anwendungen – und ein zugkräftiger Name – für Material B sollten nicht lange auf sich warten lassen. Vom selbstflickenden Fahrradschlauch bis hin zu korrosionsfesten Lacken und medizinischen Prothesen lassen sich vielerlei Einsatzmöglichkeiten denken. Da die Ausgangsmaterialien leicht erhältlich und preisgünstig sind, sollten dem Siegeszug des Supergummis keine wesentlichen Hindernisse im Weg stehen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

MEDIZIN 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Sehen mit kabellosem Retina-Implantat

Eine an der RWTH Aachen entwickelte Sehprothese für Blinde hat erste klinische Tests erfolgreich absolviert. Sie wurde gut vertragen und vermittelte bereits einfache Seheindrücke.

Von Peter Walter und Wilfried Mokwa

Etwa vier bis sieben Prozent aller Erblindungen bei Erwachsenen in Deutschland sind auf eine fortschreitende Degeneration der lichtempfindlichen Zellen in der Netzhaut zurückzuführen. Durch diese als Retinitis pigmentosa (RP) bekannte Erkrankung haben schätzungsweise 15 000 Menschen in der Bundesrepublik ihr Augenlicht verloren. Sie beginnt mit Nachtblindheit und führt über eine tunnelförmige Einschränkung des Gesichtsfelds zwischen dem 30. und 60. Lebensjahr schließlich zum völligen Verlust des Sehvermögens.

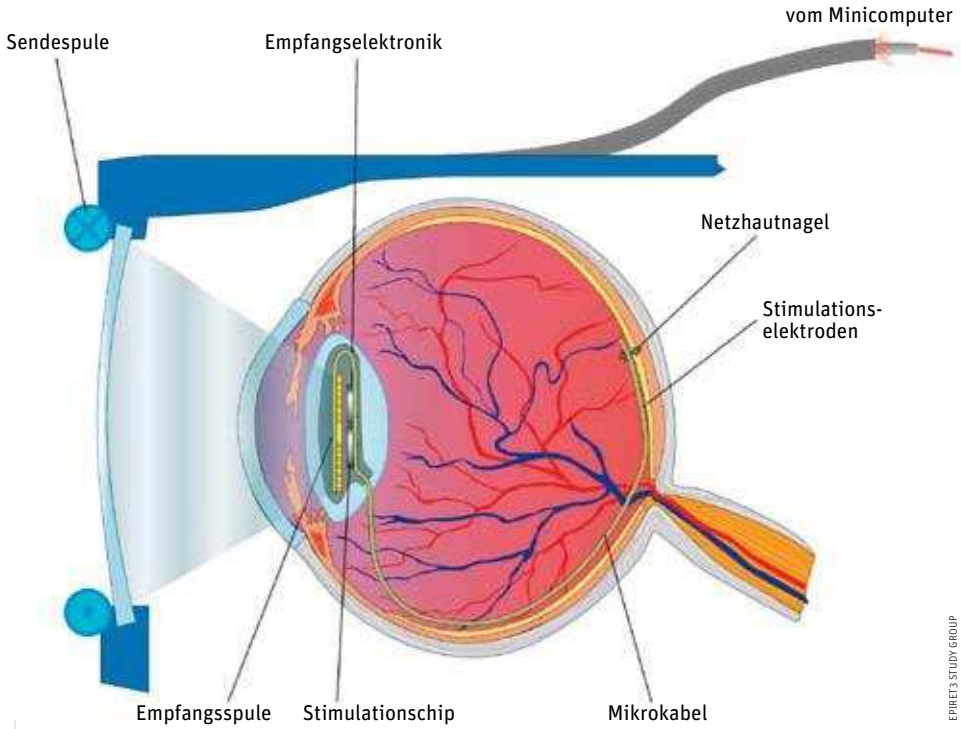
Die RP gehört zu einer Gruppe von Augenerkrankungen, die durch Mutationen in wichtigen Genen verursacht werden. Betroffen sind Schlüsselproteine in den Fotorezeptoren oder im retinalen Pigmentepithel. Insgesamt wurden etwa 130 Genorte identifiziert, die zu verschiedenen Formen von RP beitragen können. Eine Therapie ist bis heute nicht bekannt.

Seit 1995 fördert das Bundesforschungsministerium (BMFT/BMBF) im Rahmen seines Neurotechnologieprogramms Projekte zur Entwicklung implantierbarer Sehprothesen. Sie sollen Menschen, die an fortschreitender Degeneration der Fotorezeptoren leiden, ihr Augenlicht zumindest teilweise zurückgeben.

Das generelle Funktionsprinzip der Prothesen beruht darauf, dass Stromreize den noch intakten Nervenzellen in der Netzhaut jene Signale geben, die von den Photorezeptoren nicht mehr kommen.

Schon früh haben sich zwei Konzepte herauskristallisiert. Beim subretinalen Ansatz sollen miniaturisierte Fotodioden die ausgefallenen Fotorezeptoren ersetzen. Sie sind hinter der Netzhaut angebracht und registrieren das dort von der Augenlinse projizierte Bild. Beim epiretinalen Ansatz reizen dagegen auf der Vorderseite der Retina befestigte Elektroden die Ganglienzellen, deren Axone (Fasern) zusammen den Sehnerv bilden. Die Bildsignale kommen dabei von einer externen Kamera.

Welches der Systeme besser ist, muss sich noch herausstellen. Von beiden existieren nach einer Vielzahl präklinischer



EPIRET3 STUDY GROUP

Beim EPI-RET3-System – hier eine Schemazeichnung – liefert eine Kamera (nicht gezeigt) Bilder der Außenwelt. Ein Minicomputer verarbeitet die Bilddaten und sendet per Induktionsspule Signale an das Implantat, dessen Empfänger in einer künstlichen Augenlinse sitzt. Diese werden dekodiert und in Pulse umgewandelt, die an Stimulationselektroden auf der Netzhaut gehen.

Tests inzwischen Prototypen, die auch schon bei einer Reihe von blinden RP-Patienten versuchsweise eingesetzt wurden. Ziel war, zu prüfen, wie gut sie vertragen werden und ob damit Sehwahrnehmungen auslösbar sind.

Wir haben zusammen mit einer Reihe von Kollegen ebenfalls eine epiretinale Prothese entwickelt. Unser Konzept sieht zwei getrennte Einheiten vor. Im nicht implantierbaren Teil nimmt ein Kamerachip, der in eine Brille integriert ist, Bilder auf. Solche Chips lassen sich heute bereits sehr klein produzieren – man denke nur an Handykameras. Ein Minicomputer, der wie ein PDA (persönlicher digitaler Assistent) etwa an einem Gürtelclip getragen werden kann, verarbeitet die Bilddaten weiter und berechnet daraus die Stimulationspulse für die Reizelektroden.

Das Implantat des EPI-RET3-Prototyps besteht aus einem Empfänger, der in eine Intraokularlinse integriert ist (links), und einem Stimulator (rechts) mit 25 einzeln ansteuerbaren Elektroden, der auf der Netzhaut befestigt wird.

EPIRET3 STUDY GROUP

Drahtlose Energieversorgung

Unser EPI-RET3-System ist das einzige weltweit, das sowohl die für das Implantat notwendige Energie als auch die Steuerbefehle für die Elektroden nicht per Kabel durch die Augenwand – stets eine Quelle für Reizungen und Entzündungsreaktionen –, sondern drahtlos zum Implantat überträgt. Dies geschieht durch magnetische Kopplung bei einer Frequenz von 13,56 Megahertz, die für medizinische Zwecke zugelassen ist und anderen technisch genutzten Frequenzbereichen nicht ins Gehege kommt. Ein Sender in der Brille übermittelt die Signale per Amplitudenmodulation an einen Empfänger, der im Bereich der ehemaligen Linse im Auge untergebracht ist. Dieser trennt Energie und Daten voneinander. Gemäß den übermittelten Informationen werden dann die Reizelektroden auf der Netzhautoberfläche angesteuert.

In der dritten Förderphase des EPI-RET-Projekts haben wir mittlerweile einen Prototyp der implantierbaren Einheit aufgebaut, der die gesamte Funktionalität des EPI-RET-Konzepts beinhaltet (Bild oben). Er kann über den Empfänger 25 Reizelektroden ansteuern und für jede einzelne bis zu 0,1 Milliampere bereitstellen. Der Zeittakt der Stromabgabe lässt sich von außen im Bereich zwischen einer und einer hundertstel Millisekunde variieren.

Alle Komponenten des Prototyps sind auf einer Basisstruktur aus dem extrem dünnen und flexiblen bioverträglichen Kunststoff Polyimid aufgebracht und in

Exklusiv für Abonnenten

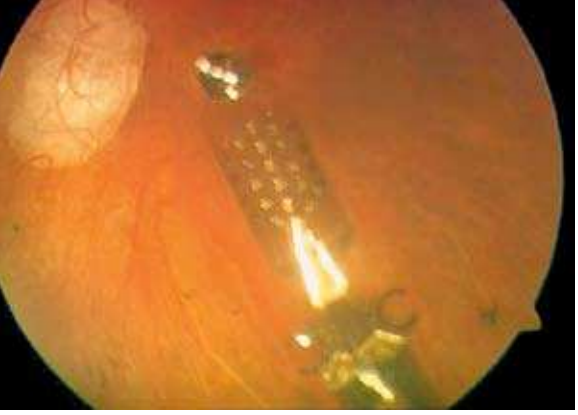
Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg.

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de



EPIRET3 STUDY GROUP

Aufnahme des Stimulators auf der Netzhautoberfläche der ersten Patientin vier Wochen nach der Implantation

einem mehrstufigen Prozess mit einem biokompatiblen Linsenmaterial verkapselt. Dadurch ist die Isolation äußerst beständig – was gewährleistet, dass keine Feuchtigkeit in das Implantat eindringen und seine Funktion gefährden kann.

In Experimenten an Zellkulturen haben wir zunächst die Bioverträglichkeit der verwendeten Materialien überprüft. In Tierversuchen gingen wir anschließend der Frage nach, ob sich das System ins Auge einsetzen lässt und dort vertragen wird. Das geschah mit standardisierten Tests, wie sie für implantierbare Medizinprodukte vorgeschrieben sind. Dabei erwies sich unser System als für Körperzellen unbedenklich.

Erfolgreiche Versuche an Blinden

Ferner prüften wir an Tieren, ob Strompulse an den Reizelektroden auf der Netzhaut eine spezifische Aktivierung der Sehrinde im Gehirn auslösen. Dazu nutzten wir Mikroelektrodenableitungen aus dem visuellen Kortex und Stoffwechselmessungen. Bei Katzen konnten wir so nachweisen, dass sich das örtliche und zeitliche Muster der Netzhautstimulation tatsächlich in der Aktivität der Sehrinde widerspiegelt. An Schweinen führten wir zudem einen Langzeitverträglichkeitstest durch, bei dem wir die Implantate teils länger als ein Jahr im Auge beließen. Dabei zeigten sich keine schwer wiegenden Folgereaktionen.

Mit den Ergebnissen der präklinischen Tests erhielten wir bei den zuständigen Behörden die Genehmigung, auch Implantations- und Stimulationsversuche bei blinden RP-Patienten durchzuführen. Zu den Auflagen zählte eine Implantationsdauer von maximal vier Wochen. An dem Test durften zudem nur Patienten teilnehmen, die außer an Retinitis pigmentosa nicht an anderen Augenkrankheiten litten und deren Sehvermögen auf dem besseren Auge höchstens zwei Prozent betrug.

Für die Implantation verwendeten wir die Technik, die sich bei den Tierversuchen bewährt hatte. Wir entfernten die Linse oder Kunstlinse sowie den Glaskörper und positionierten den Empfänger im vorderen Augenabschnitt. Danach drückten wir den Stimulator vorsichtig auf die Oberfläche der Retina und befestigten ihn dort mit zwei Spezialnägeln. Schließlich wurde der Augapfel mit Luft gefüllt.

Bei den nachfolgenden Versuchen ging es uns vor allem darum, zu ermitteln, wie stark der Reizstrom sein und welchen zeitlichen Verlauf er haben muss, damit Seheindrücke beim Patienten entstehen. Deshalb übertrugen wir keine Bilder vom Kamerasystem, sondern variierten nur an einzelnen oder Gruppen von Elektroden die Stromstärke. Außerdem erfassten wir Daten zur Verträglichkeit. Nach vier Wochen entfernten wir gemäß den Vorgaben das Implantat wieder und dokumentierten während einer Nachbeobachtungszeit von sechs Monaten den Verlauf der Heilung.

An der Studie nahmen sechs Patienten teil. Die Untersuchungen und Operationen fanden an den Universitäts-Augenkliniken in Aachen und in Essen statt. Bei allen sechs Patienten konnte das Implantat sicher in das Auge eingesetzt werden. Zwar traten durchweg Reizreaktionen auf, wie sie nach größeren netzhautchirurgischen Eingriffen durchaus üblich sind. Sie waren jedoch nur mäßig stark und ließen sich durch die gängige Behandlung mit kortison- und antibiotikahaltigen Augentropfen und -salben beherrschen.

Bei allen Patienten funktionierte das Implantat ordnungsgemäß. Interessanterweise genügten schon sehr niedrige Stromstärken, um Sehwahrnehmungen auszulösen. Dabei erkannten die Versuchspersonen Lichtpunkte und -flecken; bei mehreren gleichzeitig aktivierten Elektroden sahen sie auch Linien oder andere Muster. Die Lichtflecken erschienen je nach Reizstärke in unterschiedlichen Farben.

Die Entfernung des Implantats verlief bei fünf der sechs Patienten komplikationslos. Nur bei einem Versuchsteilnehmer trat ein Netzhautloch auf, das per Laser behandelt werden musste. Insgesamt waren die Ergebnisse der EPI-RET3-Studie positiv, was uns ermutigt, das Konzept der vollständig implantierbaren Sehprothese weiterzuverfolgen.

Zum einen wollen wir die Genehmigung beantragen, das Implantat bei weiteren Patienten unbefristet einzusetzen. Zum anderen arbeiten wir an der Fertigstellung der Kamerabrille, so dass es möglich ist, Bildeindrücke an das Implantat zu senden. Dann kann das System in Alltag genutzt werden.

Parallel dazu bauen wir einen verbesserten Prototyp einer implantierbaren Sehprothese, die über deutlich mehr Elektroden verfügen wird als das EPI-RET3-Modell. Wir hoffen, damit orientierendes Sehvermögen zu realisieren. Mit der Marktreife des neuen Modells rechnen wir in zwei bis drei Jahren.

Peter Walter ist Direktor der Augenklinik, **Wilfried Mokwa** Inhaber des Lehrstuhls I am Institut für Werkstoffe und Elektrotechnik der RWTH Aachen.

Partner der EPI-RET3-Entwicklung

- Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I der RWTH Aachen
- Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg
- Institut für Neurophysik, Universität Marburg
- Universitäts-Augenklinik Aachen
- Universitäts-Augenklinik Essen
- Dr. Schmidt Intraokularlinsen GmbH, St. Augustin
- Thomas Recording GmbH, Gießen
- Bytec Medizintechnik GmbH, Stolberg

Die gesamte Entwicklung wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektträgerschaft des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bonn gefördert.

Springers Einwürfe

Geschlechterkampf im Internet

Warum gibt es so wenig Physikerinnen?

Als ich Vorlesungen in Theoretischer Physik zu hören begann, saß in der ersten Reihe eine Ordensschwester in traditioneller Nonnentracht. Sie war die einzige Frau im Hörsaal, und bald verschwand auch sie. Dem naturwüchsigen Interesse des jungen Mannes am weiblichen Geschlecht blieb nur der gelegentliche Ausflug in andere Fakultäten.

Die triste Männerdominanz hat offenbar seither etwas nachgelassen, aber ein typisches Betätigungsfeld für Frauen ist die Physik nach wie vor nicht. Woran mag das liegen? Die Behauptung, Männer seien halt von Natur aus logisch-mathematisch begabter, darf, seit Dr. Paul Julius Möbius anno 1903 einen »physiologischen Schwachsinn des Weibes« behauptete, eher als Zeugnis männlichen Schwachsinns gelten. Doch wenn eine biologische Benachteiligung der Frau nicht mehr ernsthaft in Betracht kommt, bleibt nur die soziale: Physikerinnen werden diskriminiert (siehe meinen Einwurf von Dezember 2006).

Den empirischen Beweis dafür hat jüngst die Teilchenphysikerin Sherry Towers in den USA angetreten. Sie untersuchte die Karrieren von promovierten wissenschaftlichen Fachkräften – Postdocs – am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago. Wie Towers herausfand, leisteten weibliche Postdocs zwischen 2000 und 2005 zwar viel mehr Wartungsarbeiten und publizierten institutsintern eifriger als die männlichen Kollegen, durften aber deutlich seltener auf öffentlichen Fachtagungen vortragen *(»Nature«, Bd. 452, S. 918)*.

Dieser Befund mutet auf den ersten Blick nicht sehr kontrovers an, sondern bestätigt nur ein unter vielen weiblichen und wenigen männlichen Forschern verbreitetes Unbehagen. Frauen sind als emsige Kolleginnen gern gesehen, aber für die öffentliche Präsentation der Arbeitsergebnisse fühlen sich eher Männer zuständig.

Dennoch löste die Meldung in der Online-Ausgabe von Nature eine überraschend heftige Lawine von Kommentaren aus. Ein Physiker schrieb, nach seiner Erfahrung dächten Frauen in der Wissenschaft nun einmal »lateral« – soll wohl heißen seitwärts ausweichend, auf Umwegen –, Männer hingegen »vertikal«. Dieser angeborene Unterschied erkläre ganz natürlich die männliche Dominanz in den exakten Disziplinen. Als er darauf reichlich empörten Widerspruch erntete, sprang ihm ein Kollege hitzig bei: Die vorwiegend weiblichen Diskutanten würden ihre Gegner offenbar am liebsten »eliminieren« wie unter Hitler oder Stalin.

Angesichts der eskalierenden Debatte sah sich der Online-Moderator von »Nature« genötigt, einzugreifen und noch unsachlichere Statements zu entfernen. Ein offenbar versöhnlich gemeinter Beitrag von männlicher Seite gab zu bedenken, in einer künftig weiblich dominierten Physik wäre der isolierte Mann doch gewiss derselben Diskriminierung ausgesetzt wie derzeit Physikerinnen.

An diesem Argument finde ich immerhin lobenswert, dass es die Ursache der Ungleichbehandlung nicht in der biologischen Grundausstattung der Geschlechter sucht, sondern in sozialer Gruppendynamik. Andererseits erscheint es mir doch sehr verfrüht, für männliche Physiker schon heute vorbeugenden Minderheitenschutz zu beantragen. Noch ist es ein weiter Weg zu geschlechtlicher Fairness in der Wissenschaft – dafür bietet der erbitterte Online-Streit schlagendes Anschauungsmaterial.

Michael Springer

Auf Dauer erwarte ich mir die Lösung des Problems weniger von moralischen Appellen als vom Bedarf an Fachkräften in der Wissensgesellschaft. Wer die geistige Potenz einer guten Hälfte der Bevölkerung unterschätzt und brachliegen lässt, betreibt einfach die falsche Bildungs- und Wissenschaftspolitik.

wichtige **online** **adressen**

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Foto-Scout-Zuse
Die lernende Bildsuchmaschine für Ihren PC.
www.foto-scout-zuse.com

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

WISSENSlogs
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

Die chaotische Geburt der PLANETEN

Lange glaubte man, die Entstehung von Planeten sei ein vorgezeichneter Prozess, der zu einem absehbaren Ergebnis führt. Doch wie sich jetzt herausstellt, verläuft er erstaunlich chaotisch.

Von Douglas N. C. Lin

Nach kosmischen Maßstäben sind Planeten bloß unbedeutende Brocken. In der großen Geschichte des expandierenden Universums spielen sie nur eine unwesentliche Rolle. Dennoch stellen sie die vielseitigste Klasse astronomischer Objekte. Nirgendwo sonst im Weltall ist ein derartig komplexes Zusammenspiel astronomischer, geologischer, chemischer und biologischer Prozesse zu beobachten wie in und auf Planeten. Und nicht zuletzt: Diese Gebilde sind die einzigen Orte, auf denen Leben entstehen und existieren kann – zumindest so, wie wir es kennen.

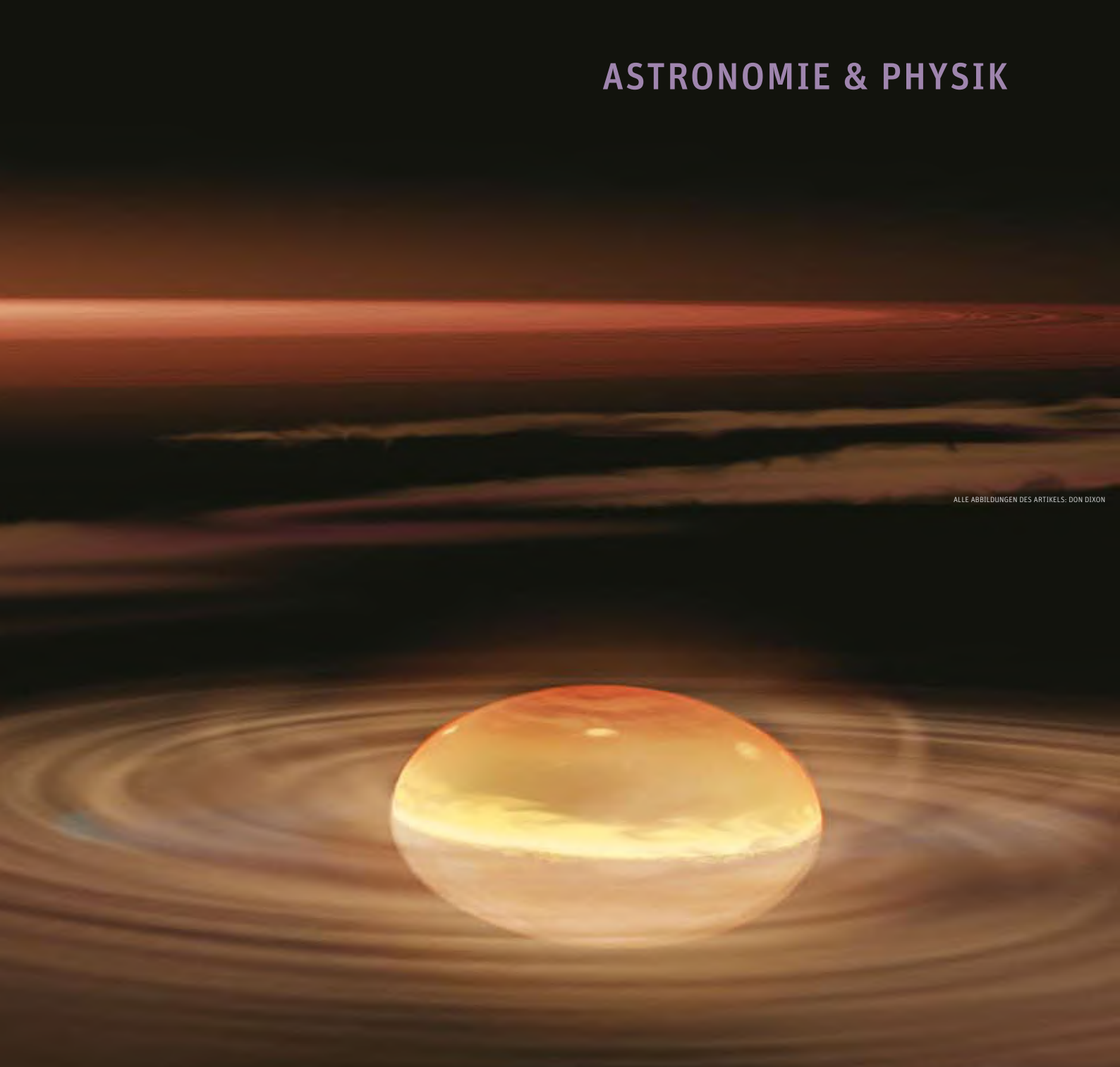
In unserem Sonnensystem unterscheiden sich die Planeten extrem voneinander. Kaum zu glauben, dass es in den Tiefen des Kosmos dennoch völlig andere Welten gibt als die uns vertrauten. Aber wie sich in den letzten Jahren herausstellte, in denen die Astronomen mehr als 250 Exoplaneten entdeckt haben, ist es genau so.

Hinsichtlich ihrer Masse, Größe und Zusammensetzung können sich Exoplaneten so krass voneinander unterscheiden, dass es schwerfällt, ihre Entstehung als einen einheitlichen Vorgang nachzuvollziehen. Während meines Studiums in den 1970er Jahren neigte man noch zu der Annahme, dass sich die Himmelskörper in einem wohl geordneten, deterministischen Prozess herausbilden. Am Anfang stehe eine formlose Gas- und Staubscheibe, die sich nach und nach zu einem Planetensystem ähnlich dem unseren verdichte.

Mittlerweile hat sich jedoch gezeigt, dass dieser Prozess viel ungeregelter abläuft und in jedem Sonnensystem zu einem anderen Ergebnis führt. Die Planeten, die daraus schließlich hervorgehen, sind die Überlebenden eines tumultartigen Nebeneinanders von Wachstum und Zerstörung. Etliche Welten überstehen dieses Chaos nicht: Gerade erst gebildet, stürzen sie in ihren Stern, werden zertrümmert oder hinaus in den Weltraum geschleudert. Auch die Erde hatte womöglich einst Geschwister, die – in die Tiefen des Alls katapultiert – heute durch finstere Leere driften.

Wer die Entstehung von Planeten untersucht, bewegt sich am Schnittpunkt von Astrophysik, Planetologie, statistischer Mechanik und nichtlinearer Dynamik. In der heutigen Planetenforschung haben sich im Großen und Ganzen zwei führende Theorien etabliert. Das Szenario der stufenweisen Akkretion *(sequential-accretion scenario)* postuliert, dass am Anfang winzige Staubkörnchen stehen, die sich nach und nach zusammenlagern, bis sich daraus feste Gesteinsklumpen bilden. Diese Klumpen zie-

Ein junger Riesenplanet sammelt Gas aus der protoplanetaren Scheibe eines neugeborenen Sterns.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: DON DIXON

hen im weiteren Verlauf entweder gewaltige Gasmengen an und entwickeln sich zu Gasriesen wie Jupiter; oder aber sie binden kein Gas an sich und wachsen zu Gesteinsplaneten wie der Erde. Dieses Szenario hat ein wichtiges Problem: Gasplaneten entstünden auf diese Weise nur sehr langsam und wären möglicherweise nur sehr selten, da die Scheibe unter Umständen vor Fertigstellung des Planeten das Gas verliert. Dies wirft aber die Frage auf, warum Gasplaneten relativ häufig sind.

Die alternative Theorie geht vom Szenario der Schwerkraftinstabilität aus *(gravitational-instability scenario)*. Es besagt, dass Gasriesen relativ abrupt entstehen, sobald die protoplanetare Gas- und Staubscheibe zerfällt – ein Prozess ähnlich der Entstehung von Sternen, nur in viel kleinerem Maßstab. Auch diese Hypothese ist umstritten, weil sie voraussetzt, dass die Scheibe stark instabil wird, was womöglich nicht zutrifft. Zudem haben die Astronomen nachgewiesen, dass zwischen den schwersten Planeten und den leichtesten Sternen eine große »Wüste« liegt: Es gibt nur wenige Himmelskörper, deren Masse dazwischen angesiedelt ist.

Das lässt vermuten, dass Planeten nicht einfach bloß kleine Sterne sind, sondern eine komplett eigenständige Entwicklung

In Kürze

- Bisher konnten Planetenwissenschaftler ihre Theorien nur an unserem Sonnensystem testen. Heute können sie **Dutzende voll entwickelter Planetensysteme** untersuchen. Jedes davon ist einzigartig.
- In der wichtigsten Theorie zur **Planetenentstehung** wird angenommen, dass winzige Staubkörner zusammenklumpen und Gas anziehen. Ein chaotisches Wechselspiel konkurrierender Prozesse führt zu völlig unterschiedlichen Sonnensystemen.

durchlaufen. Obwohl noch nicht entschieden ist, welche von den beiden Theorien sich durchsetzen wird, betrachten die meisten Wissenschaftler das Szenario der stufenweisen Akretion als das plausiblere. Daher möchte ich mich hier auf dieses konzentrieren und die entscheidenden Phasen vorstellen.

1. Eine interstellare Wolke kollabiert

Zeitpunkt: 0 (Beginn der Planetengenese)

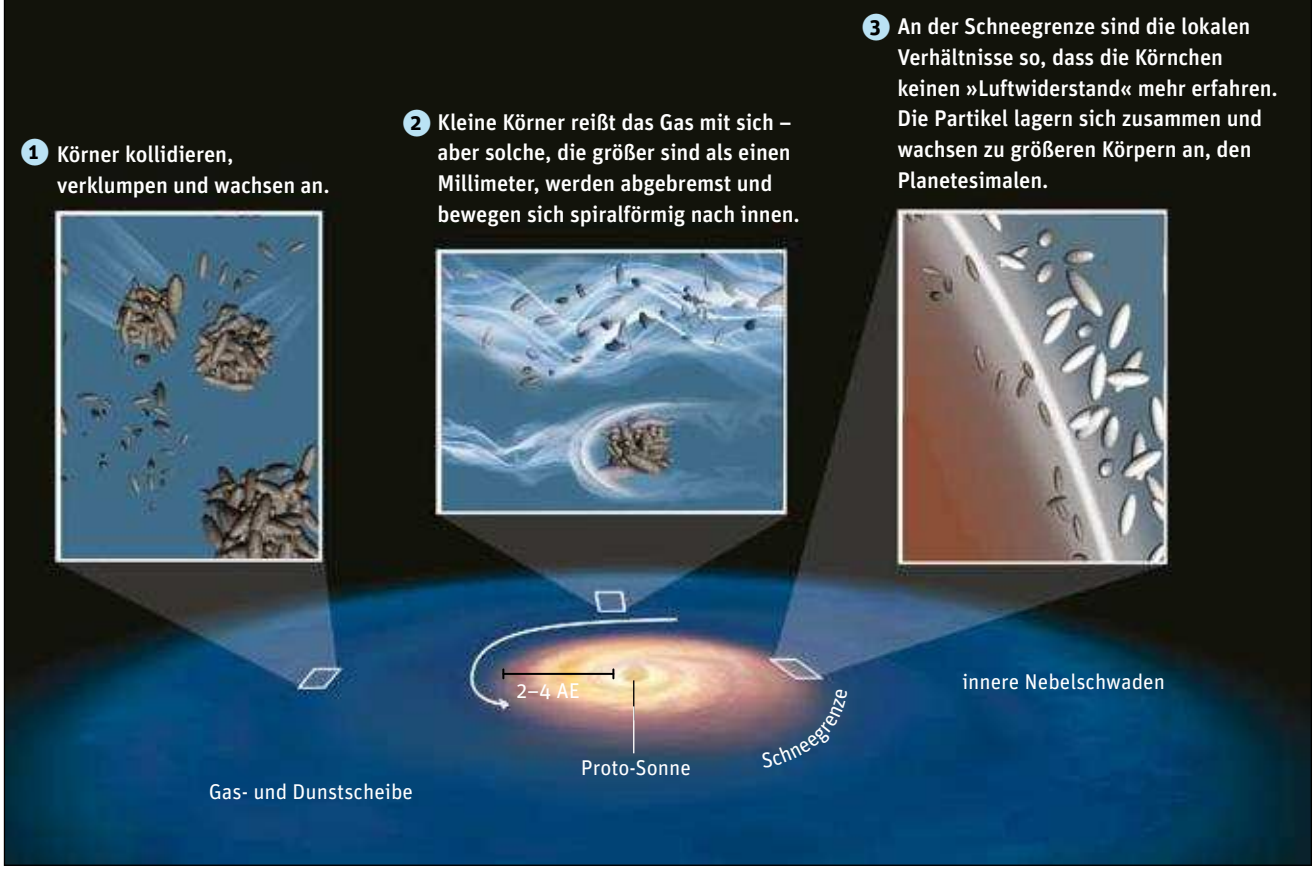
Unser Sonnensystem gehört zu einer Galaxie mit mindestens zweihundert Milliarden Sternen, die von Gas- und Staubwolken durchsetzt ist. Diese Wolken bestehen zum großen Teil aus dem Abfall – also aus den Fusionsproduktionen – früherer Sterngenerationen. Der Begriff »Staub« bezeichnet in diesem Zusammenhang mikroskopisch kleine Krümel aus Wassereis, Eisen und anderen festen Substanzen, die einst in den kühlen Außenschichten von Sternen kondensierten und dann in den interstellaren Raum geblasen wurden. Wenn solche Gas- und Staubwolken genügend kalt und dicht sind, können sie unter ihrem Eigengewicht zu Sternen kollabieren – ein Prozess, der zwischen hunderttausend und ein paar Millionen Jahren dauert (siehe »Geburt im Trümmerhagel«, Spektrum-Spezial 2/2007 »Raumschiff Erde«, S.11).

Jeder neugeborene Stern ist dabei von einer rotierenden Scheibe umgeben – übrig gebliebenes Material, das von seiner Schwerkraft angezogen wird, aber nicht in ihn stürzt. Aus ihr gehen später die Planeten des Sterns hervor. In den jungen Scheiben, die gerade erst entstanden sind, sammeln sich hauptsächlich die kosmischen Urgase Wasserstoff und Helium. In ihrer heißen und dichten Zentralregion nahe dem Stern verdampfen die Staubkörnchen. In den kühlen, dünneren Außenbereichen hingegen bleiben die Partikel intakt; sie wachsen vor allem durch Koagulation.

Die Astronomen kennen bereits viele junge Sterne, die von Scheiben umgeben sind.

Phase 2: Kosmische Wollmäuse

Sogar die mächtigsten Planeten haben einmal klein angefangen: Sie begannen als mikrometergroße Staubpartikel (die Asche längst verglühter Sterne), die in einer wirbelnden Scheibe aus Gas eingebettet waren. Die Temperatur in einer solchen Scheibe nimmt mit der Distanz zum Stern ab. Daraus resultiert eine so genannte Schneegrenze um den Stern, jenseits derer das Wasser gefroren vorliegt. Bei uns kennzeichnet sie die Grenze zwischen den inneren Gesteinsplaneten und den äußeren Gasriesen.



Bei Sonnen mit einem Alter zwischen einer Million und drei Millionen Jahren enthalten diese Materieansammlungen viel Gas. Gestirne, die älter sind als zehn Millionen Jahre, besitzen hingegen gasarme Scheiben, weil ihre intensive Strahlung das Gas bereits fortgeblasen hat. Daraus folgt, dass die Planetenentstehung innerhalb von zehn Millionen Jahren abgeschlossen sein muss, andernfalls käme sie nicht zu einem Ende, da ihr vorzeitig das Baumaterial entzogen würde. Die protoplanetaren Scheiben, die bisher beobachtet wurden, enthalten etwa die gleiche Masse an schweren Elementen wie die Planeten unseres Sonnensystems. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass Letztere tatsächlich aus einer solchen Scheibe hervorgegangen sind.

Resultat: Der neugeborene Stern ist umgeben von Gas und mikrometergroßen Staubkörnern.

2. Die Scheibe sortiert sich selbst

Zeit: eine Million Jahre

Die Staubkörner in der protoplanetaren Scheibe werden vom umgebenden Gas durcheinandergewirbelt und kollidieren miteinander, wobei sie manchmal zusammenklumpen, manchmal zertrümmert werden. Die Partikel absorbieren das Licht des jungen Sterns und senden langwellige Infrarotstrahlung aus, wodurch sich nach und nach die ganze Scheibe erwärmt – bis in ihre dunkelsten Regionen hinein. Temperatur, Dichte und Druck in der Scheibe nehmen mit wachsender Entfernung zum Stern im Allgemeinen ab.

Wegen des Gleichgewichts von Druck, Rotation und Schwerkraft umrundet das Gas den jungen Stern etwas langsamer, als es ein kompakter Festkörper mit dem gleichen Bahnradius tun würde. Deshalb neigen selbst Staubkörner ab einem Durchmesser von ein paar Millimetern dazu, sich schneller zu bewegen als das umgebende Gas. Auf ihrer Umlaufbahn bläst ihnen also ein Wind entgegen, der sie abbremst. Sie verlieren an Tempo und bewegen sich auf einer Spiralbahn nach innen, also auf den Stern zu. Je größer die Partikel sind, desto ausgeprägter ist dieser Effekt. Brocken mit einem Durchmesser von einem Meter können ihre Distanz zum Zentralgestirn innerhalb von tausend Jahren halbieren.

Weil sie ihrer Sonne immer näher kommen, erwärmen sich die Staubkörner. Falls sie noch Stoffe mit niedrigem Siedepunkt enthalten – zum Beispiel Wasser –, so verdampfen diese innerhalb einer gewissen Distanz zum Stern. Diese Entfernung nennen Fachleute »Schneegrenze«, und sie liegt bei zwei bis vier Astronomischen Einheiten (AE), in unserem Sonnensystem also irgendwo zwischen Mars und Jupiter (eine AE entspricht dem mittleren Abstand Erde-Sonne). Die Schneegrenze teilt das Planetensystem in zwei Regionen: eine innere, arm an flüchtigen Stoffen, aber reich an Gesteinsbrocken, sowie eine äußere mit viel Wassereis und anderen flüchtigen Stoffen.

Direkt an der Schneegrenze reichern sich Wassermoleküle an, nachdem sie aus den Staubkörnern herausgedampft sind. Das löst in dieser Zone eine Folge von Ereignissen aus. Die Ansammlung der Wassermoleküle verändert die Eigenschaften des Gases abrupt, was zu einem Druckabfall führt, was wiederum die Umlaufgeschwindigkeit des Gases erhöht. Die Staubkörner in der Nähe erfahren nun plötzlich keinen Gegenwind mehr, sondern einen Rückenwind, der sie beschleunigt, was auch ihre Spiralbewegung in Richtung des Sterns beendet. Weil aber aus den äußeren Regionen der Scheibe nach wie vor Partikel eintreffen, die nach innen driften, sammelt sich der Staub

Phase 3: Der Aufstieg der Oligarchen

Myriaden kilometergroßer Planetesimale, entstanden in Phase 2 (siehe Kasten links), backen zu relativ wenigen mond- bis erdgroßen Himmelskörpern zusammen, die man als Planetenkeimlinge bezeichnet. Diese beherrschen dann die Umgebung ihrer jeweiligen Umlaufbahnen. So entsteht eine Oligarchie von Planetenkeimlingen, die um die verbliebene Materie in der Scheibe wetteifern.

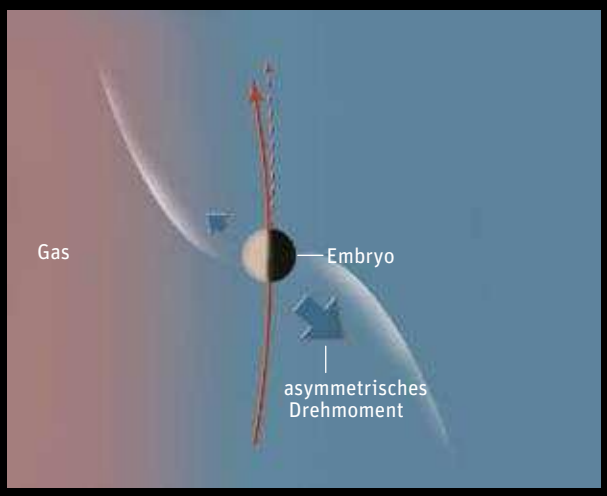
Planetesimale kollidieren und haften zusammen.

Zufällige Bewegungen der Planetesimale bremsen und mitteln sich gegenseitig heraus. Die entstehenden Planetenkeimlinge nehmen allmählich kreisförmige Umlaufbahnen an.

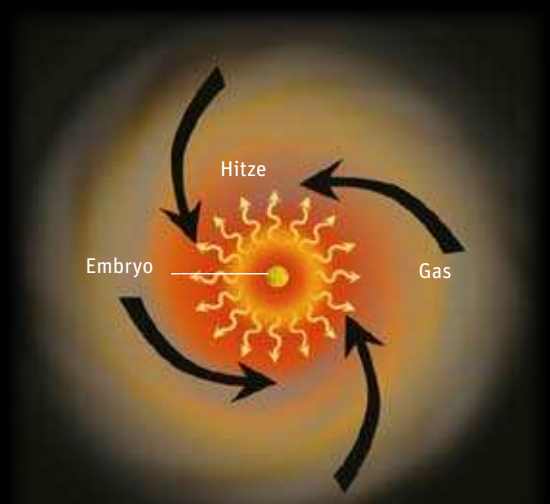
Den Planetenkeimlingen geht der Rohstoff aus, so dass sie aufhören zu wachsen.

Phase 4: Ein Riesenfortschritt für die Planetenfamilie

Die Geburt eines Gasriesen wie Jupiter ist ein entscheidender Moment in der Geschichte eines Planetensystems. Ist sie abgeschlossen, formt der Gigant den Rest des Systems. Doch damit es überhaupt dazu kommt, muss der entsprechende Planetenkeimling schneller Gas anlagern als er nach innen wandert.



Die Bildung des Gasriesen wird von den Wellen behindert, die dieser in dem umgebenden Gas auslöst. Die Wellen üben asymmetrische Drehmomente auf den Planeten aus, was ihn verlangsamt und nach innen treibt.



Die Schwerkraft des Planeten zieht umgebendes Gas an, doch dieses kann sich nur dann an den Himmelskörper binden, wenn es hinreichend abkühlt. Dieser Prozess kann so lange dauern, dass der Planet bereits nach innen gewandert ist, bevor er es bis zum Gasriesen geschafft hat.

ERGIBT JUPITER EINEN SINN?

Von allen Etappen der Planetenentstehung ist **die Geburt des ersten Gasriesen** in mancher Hinsicht am wenigsten verstanden. Der Kern Jupiters ist relativ klein – jedenfalls liegt seine Masse weit unterhalb des kritischen Werts, den Forscher als notwendig erachten, damit das anfänglich auf ihn stürzende Gas abkühlen und sich auf ihm absetzen konnte. Vielleicht haben damals noch andere Kühlmechanismen eine Rolle gespielt, zum Beispiel die Wärmeleitung in der Minischeibe um den Proto-Jupiter.

Ein weiteres Problem: der Theorie zufolge ist der **Proto-Jupiter schneller in Richtung Sonne** gewandert, als er Gas einsammeln konnte. Irgendetwas muss also seine Einwärtsdrift gebremst haben, etwa Gasdruckdifferenzen, Gasflüsse oder Turbulenzen.

an der Schneegrenze an, so dass diese sich allmählich zur »Schneewehe« entwickelt.

Auf relativ engem Raum zusammengedrängt, kollidieren die Körnchen nun häufiger und verschmelzen miteinander. Auf diese Weise aggregieren die Staubkörner fortwährend bis kilometergroße Körper entstehen, die Planetesimale. Sie sind sehr schwer zu beobachten, aber Astronomen können indirekt auf ihre Anwesenheit schließen, indem sie die Überreste ihrer Kollisionen nachweisen (siehe »Suche nach der Nadel in stellaren Heuhaufen«, Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2004, S. 30).

Resultat: Schwärme von kilometergroßen Brocken, Planetesimale genannt, umkreisen den jungen Stern.

3. Planetenkeimlinge entstehen

Zeit: eine Million bis zehn Millionen Jahre

Die kraterübersäten Landschaften von Mond und Merkur lassen keinen Zweifel daran, dass junge Planetensysteme wahre Schießbuden sind. Die häufigen Zusammenstöße zwischen den Planetesimalen lassen diese entweder miteinander verschmelzen oder in unzählige Stücke zerbersten. Das Wechselspiel von Verklumpung (Koagulation) und Zertrümmerung (Fragmentierung) führt zu einer Größenverteilung, bei der die Gesamtoberfläche des entstehenden Planetensystems überwiegend auf die kleinen Himmelskörper verteilt ist, während seine Masse vor allem in den großen Körpern konzentriert ist. Die jungen Trabanten bewegen sich zunächst auf Ellipsenbahnen, allmählich jedoch immer mehr auf Kreisen – zum einen wegen der zahlreichen Kollisionen der Körper untereinander, zum anderen wegen ihrer Wechselwirkung mit dem Gas.

Am Anfang ist die Planetenentstehung ein sich selbst verstärkender Prozess. Je größer die Planetesimale werden, umso stärker ist ihre Schwerkraft, und umso häufiger binden sie andere, masseärmere Körper an sich. Wenn sie eine Masse erreichen, die jener unseres Monds vergleichbar ist, üben sie jedoch eine so große Gravitationswirkung aus, dass sie den umgebenden Staub kräftig durchrühren und aus der Bahn lenken, bevor sie ihn an sich ziehen können. Auf diese Weise begrenzen sie ihr eigenes Wachstum. Das junge Planetensystem entwickelt sich zu einer Oligarchie – also zu einem Nebeneinander von vielen Planetenkeimlingen, die alle etwa die gleiche Masse besitzen und miteinander darin wetteifern, die letzten verbliebenen Planetesimale an sich zu binden.

Die Planetenkeimlinge haben jeweils nur einen begrenzten »Weidegrund«: Sie können sich nur Material aus ihrer engeren Nachbarschaft einverleiben. Sobald sie sämtliche Planetesimale innerhalb dieser Zone geschluckt

haben, hören sie auf zu wachsen. Aus schlichten geometrischen Gründen sind der Weidegrund eines Protoplaneten und die Dauer seines Wachstums umso größer, je weiter dieser von seinem Stern entfernt ist.

Beim Abstand von einer Astronomischen Einheit stagniert die Größenzunahme eines jungen Trabanten bereits nach 100 000 Jahren bei 0,1 Erdmassen. Ist der Planetenkeimling hingegen fünf AE von seinem Stern entfernt, dann wächst er mehrere Millionen Jahre lang bis auf etwa vier Erdmassen. Noch größer kann er werden, wenn er sich nahe der Schneegrenze bewegt oder, falls die protoplanetare Scheibe Lücken hat, entlang der Ränder dieser Lücken. Hier neigen die Planetesimale nämlich zur Akkumulation.

Im Zuge solcher Wachstumsprozesse entsteht allmählich ein Überschuss an potenziellen Planeten, von denen aber im weiteren Verlauf nur wenige überleben. Die Wandelsterne in unserem Sonnensystem scheinen auf den ersten Blick weit voneinander entfernt zu sein, aber in Wirklichkeit sind sie eigentlich so nahe beieinander, wie es überhaupt nur geht. Würde man in unser heutiges Sonnensystem einen weiteren erdähnlichen Planeten irgendwo zwischen Mars und Sonne einfügen, dann würde dies die Umlaufbahnen sämtlicher terrestrischer Trabanten – Merkur, Venus, Erde und Mars – destabilisieren. Das Gleiche gilt auch für andere Sonnensysteme.

Resultat: eine Oligarchie von Planetenkeimlingen mit Massen zwischen Mond und Erde

4. Ein Gasriese wird geboren

Zeit: eine Million bis zehn Millionen Jahre

Jupiter entwickelte sich wahrscheinlich aus einem erdgroßen Planetenkeimling. Dieser zog im Lauf der Zeit immer mehr Gas an sich, bis eine gigantische Kugel von 300 Erdmassen entstanden war. Ein solch spektakuläres Wachstum hängt von verschiedenen konkurrierenden Effekten ab. Junge Planeten ziehen wegen ihres stärker werdenden Schwerefelds Gas aus der Umgebung an. Doch während dieses auf den Trabanten stürzt und sich dabei erhitzt, setzt es Energie frei. Um dauerhaft an den Himmelskörper gebunden zu werden, muss es jetzt abkühlen.

Deshalb hängt das Wachstumstempo eines (Gas-)Planeten von der Abkühlrate des einfallenden Gases ab. Ist sie zu klein, dann bläst die Strahlung des Zentralsterns das Gas davon, bevor der Planet es an sich binden und eine Atmosphäre aufbauen kann. Bei einem jungen Trabanten, dessen Gashülle gerade entsteht, sind es vor allem die äußeren Atmosphärenschichten, die den Wärmetransport behindern. Ihre Lichtdurchlässigkeit, die hauptsächlich von ihrer chemischen Zusammensetzung abhängt, sowie das Temperaturgefälle in ihrem Innern bestimmen, wie viel Strahlung sie pro Zeiteinheit durchlassen.

Frühere Modelle ließen vermuten, dass Planetenkeimlinge eine kritische Masse besitzen müssen – etwa zehnmal größer als die Erde –, damit die Wärme hinreichend effizient durch ihre äußeren Atmosphärenschichten transportiert wird. Solche Himmelskörper können nahe der Schneegrenze entstehen, wo das Material besonders schnell akkumuliert. Das würde erklären, warum Jupiter sich sehr nahe an der Schneegrenze unseres Sonnensystems befindet. Unter bestimmten Umständen können derart massereiche Planetenkeimlinge aber auch anderswo in der protoplanetaren Scheibe entstehen – dann nämlich, wenn sie mehr Material enthält als die Planetologen früher annahmen. Tatsächlich haben Astronomen mittlerweile viele Sterne beobachtet, deren Scheiben vielfach dichter sind als traditionell vermutet. In diesem Fall stellt der Wärmetransport kein unüberwindbares Hindernis mehr dar.

Das Wachstum der Gasplaneten wird aber auch dadurch behindert, dass der Planetenkeimling dazu neigt, spiralförmig auf seinen Zentralstern zuzustürzen. In einem Prozess, der Experten als Typ-I-Migration bekannt ist, löst der junge Trabant eine Welle in der Gasscheibe aus, die mittels Gravitation auf ihn zurückwirkt. Wie geht das? Das Wellenmuster folgt dem Planeten. Auf der Seite, die weiter

ZEITPLAN FÜR DIE WELTENHERSTELLUNG

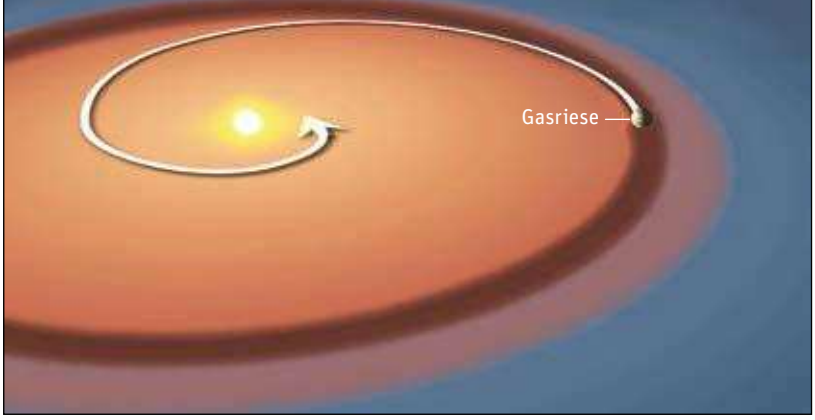
Mit Hilfe radiometrischer Datierung von Asteroiden und Beobachtungen von Scheiben um andere Sterne haben Planetologen einen groben Fahrplan der Planetenentstehung aufgestellt.

Der Stern entsteht im Zentrum der Scheibe, in seinem Kern setzt die Kernfusion ein.

- **0,1 bis 2 Millionen Jahre**– Staubkörner lagern sich zu Planetenkeimlingen mit mond- bis erdähnlichen Massen zusammen.
- **2 Millionen Jahre**– der erste Gasriese entsteht und säubert das System von den Asteroiden der ersten Generation.
- **10 Millionen Jahre**– der Gasriese löst die Bildung von anderen Gasplaneten und auch von terrestrischen Trabanten aus; die Scheibe enthält zu diesem Zeitpunkt kaum noch Gas.
- **800 Millionen Jahre**– die Umlagerung der Planeten setzt sich bis etwa eine Milliarde Jahre nach der Geburt des Systems fort.

PHASE 5: WIE MAN EINEN STERN UMARMT

In vielen Systemen entsteht ein Riesenplanet und bewegt sich dann spiralförmig nach innen, bis er seinen Zentralstern fast erreicht. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Gas der Scheibe auf Grund innerer Reibung an Energie verliert und nach innen fällt, wobei es den Planeten mit sich zieht. Irgendwann kommt der Planet dem Stern so nahe, dass dieser ein Drehmoment auf die Umlaufbahn des Planeten ausübt und sie dadurch stabilisiert.



vom Stern entfernt ist, bewegt sich das Gas etwas langsamer als der Planet selbst und bremst ihn über die Schwerkraft allmählich ab.

Auf der anderen Seite, die näher am Stern liegt (also innerhalb der Planetenbahn), bewegt sich das Gas etwas schneller als der Planet, zerrt diesen vorwärts und beschleunigt ihn. Die außen liegende Region der Gaswelle ist jedoch größer und gewinnt dieses Tauziehen – unterm Strich wird der Planetenkeimling gebremst, verliert Energie und bewegt sich allmählich auf seinen Stern zu. Innerhalb einer Million Jahre nähert er sich diesem um mehrere Erd-Sonne-Abstände. An der Schneegrenze kommt diese Spiralbahn jedoch tendenziell zum Stillstand, weil der bremsende Gegenwind des Gases sich dort in einen Rückenwind verwandelt und den Planetenkeimling nun wieder anschiebt. Das könnte eine weitere Erklärung dafür sein, warum Jupiter sich ziemlich exakt an der Schneegrenze unseres Sonnensystems bewegt.

Das Wachstum des Planetenkeimlings, seine Migration nach innen und die Abwanderung des Gases aus der Sternscheibe verlaufen alle etwa mit der gleichen Geschwindigkeit. Welcher von diesen Prozessen die Oberhand gewinnt, hängt dann vom Zufall ab. So kann es passieren, dass mehrere Generationen von Planetenkeimlingen auf diesem Entwicklungsweg starten, dann aber abwandern, bevor sie ihn vollenden. In ihrem Kielwasser könnten immer wieder Planetesimale aus den äußeren Regionen der Scheibe sich nach innen bewegen und den Prozess wiederholen, bis sich irgendwann einmal ein Gasriese herausbildet. Oder das Gas der Sternscheibe ist völlig verschwunden, so dass nie ein Gasplanet entsteht.

Astronomen haben entdeckt, dass nur etwa zehn Prozent der bisher untersuchten sonnenähnlichen Sterne von jupiterähnlichen Planeten umkreist werden. Die Kerne dieser Trabanten sind vielleicht die wenigen Überlebenden vieler Generationen von Planetenkeimlingen, sozusagen die letzten Mohikaner.

Das Gleichgewicht zwischen den geschilderten Prozessen hängt davon ab, wie das Planetensystem anfänglich mit Material ausgestattet ist. Ungefähr ein Drittel jener Sterne, die reich an schweren Elementen sind, werden von jupiterähnlichen Planeten umkreist. Vermutlich besaßen diese Sonnen einst relativ dichte Scheiben, in denen große Planetenkeimlinge entstanden, die dann – auf Grund schnellen Wärmetransports durch ihre äußeren Atmosphärenschichten – große Gasmassen an sich ziehen konnten. Umgekehrt findet man bei Sternen, die klein oder arm an schweren Elementen sind, nur relativ wenige Trabanten. Hat das Wachstum eines Planetenkeimlings erst einmal eingesetzt, eskaliert es rasch. Innerhalb von nur tausend Jahren kann ein jupiterähnlicher Planet bereits die Hälfte seiner endgültigen Masse erreichen. Dabei wird beim Einsturz der eingefangenen Materie so viel Energie freigesetzt, dass der Planet kurzzeitig sogar heller strahlt als seine Sonne. Der Trabant stabilisiert sich, sobald er genug Masse hat, damit sich seine Typ-I-Migration in ihr Gegenteil verkehrt: Statt dass die Gasscheibe die Umlaufbahn des Planeten verändert, ist es nun der Planet, der das Gas in der Scheibe auf andere Bahnen drängt. Das Material innerhalb der Umlaufbahn des Planeten bewegt sich schneller als dieser, wird deshalb von seiner Schwerkraft gebremst und fällt auf den Zentralstern zu – also weg vom Planeten.

Außerhalb der Planetenbahn kreist das Gas langsamer als der Trabant und wird daher von dessen Schwerkraft beschleunigt, wodurch es nach außen driftet – also abermals vom Planeten weg. Beiderseits der Planetenbahn entsteht so eine Lücke in der Gas- und Staubscheibe, der Trabant schneidet sich also selbst von seiner Rohstoffzufuhr ab. Zwar dringen die Gasmassen tendenziell in diese Lücke wieder ein. Aber Computersimulationen zeigen, dass der Planet sie auf Abstand hält, sofern er mehr als eine Jupitermasse besitzt (in einer Entfernung zum Stern von fünf Astronomischen Einheiten).

Diese kritische Masse hängt vom Timing ab. Je früher ein Planet entsteht, umso mehr Gas ist noch in der Scheibe vorhanden und umso größer kann der Planet letztlich werden. Saturn besitzt weniger Masse als Jupiter – möglicherweise nur deshalb, weil er ein paar Millionen Jahre später entstand als dieser. Astronomen haben festgestellt, dass es nur wenige Trabanten gibt, die zwischen zwanzig Erdmassen (wie der Neptun) und hundert Erdmassen (wie der Saturn) besitzen. Das ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass das Timing bei der Planetenentstehung außerordentlich wichtig ist.

Resultat: jupiterähnliche Planeten (oder auch nicht)

5. Der Gasriese wird unruhig

Zeit: eine Million bis drei Millionen Jahre

Seltsamerweise kreisen viel Exoplaneten, die in den letzten zehn Jahren entdeckt wurden, sehr eng um ihren Stern – viel enger als Merkur um unsere Sonne. Diese so genannten heißen Jupiter können nicht auf ihren gegenwärtigen Umlaufbahnen entstanden sein – schon allein deshalb, weil dort ihre Weidegründe viel zu klein gewesen wären, um sie

DIE GRÖSSTEN UND BESTEN

Hier sind die Rekordhalter in extrasolaren Planetensystemen (Stand: März 2008). Die Massen der Planeten sind – auf Grund von Messunsicherheiten – angenähert.

Schwerster Zentralstern:
HD 13189
(4,5 Sonnenmassen)

Leichtester Zentralstern:
2M1207
(0,025 Sonnenmassen – was zu niedrig ist, um ein dauerhaftes Fusionsfeuer im stellaren Kern aufrechtzuerhalten)

Engste Planetenbahn:
HD 41004B b (0,0177 AE)

Weiteste Planetenbahn:
UScoCTIO 108 b (670 AE)

Schwerster Planet:
GQ Lup b
(21,5 Jupitermassen)

Leichtester Planet:

mit genügend Rohstoffen zu versorgen. Ihre Präsenz auf so engen Umlaufbahnen scheint eine Ereignissequenz vorauszusetzen, wie sie offenbar in unserem eigenen Sonnensystem nicht passiert ist.

Als Erstes muss sich im inneren Teil des Planetensystems ein Gasriese herausbilden – entweder nahe oder deutlich innerhalb der Schneegrenze –, während die Scheibe noch viel Gas enthält. Dies setzt eine unerwartet hohe Konzentration an festen Partikeln in der Scheibe voraus.

Als Zweites muss der Gasplanet zu seiner jetzigen Position wandern. Über die Typ-I-Migration geht das nicht, weil sie nur bei Planetenkeimlingen funktioniert, die noch nicht viel Gas angezogen haben. Stattdessen kommt hier ein Mechanismus zum Tragen, der fachlich als Typ-II-Migration bezeichnet wird. Der Riesenplanet erzeugt entlang seiner Umlaufbahn eine Lücke in der protoplanetaren Scheibe und hindert die Gasmassen, diese Kluft zu überqueren. Dazu muss der Trabant fortwährend das Bestreben des turbulenten Gases unterdrücken, sich zu vermischen und zu verbreiten. Weil dieser Prozess nie endet – das Gas sickert ständig aufs Neue in die orbitale Lücke ein –, verliert der Planet allmählich an Bahnenergie und driftet langsam nach innen. Es dauert ein paar Millionen Jahre, bis ein Trabant auf diese Weise einige AE weit gewandert ist. Deshalb muss der Planet bereits im inneren Teil des Sonnensystems starten – andernfalls würde er es nicht in die Nähe des Sterns schaffen. Während er nach innen driftet, drängt er alle Planetesimale und Planetenkeimlinge, die auf seinem Weg liegen, aus ihrer Bahn und erzeugt dabei womöglich »heiße Erden«, die extrem eng um den Stern kreisen.

Als Drittes muss dann schließlich die Migration des Gasplaneten stoppen, bevor dieser in den Stern stürzt. Das passiert möglicherweise nicht in allen Systemen, und viele Planeten könnten deshalb in ihr Zentralgestirn stürzen.

Ergebnis: eng umlaufender Riesenplanet

6. Andere Riesenplaneten schließen sich der Familie an

Zeit: zwei bis zehn Millionen Jahre

Sobald sich ein Riesenplanet herausgebildet hat, erleichtert er die Entstehung weiterer Gasgiganten. Viele, vielleicht die meisten bekannten Riesenplaneten haben ähnlich große Geschwister. In unserem Sonnensystem half Jupiter dem Saturn, viel schneller an Masse zu gelangen, als es dieser auf sich allein gestellt hätte schaffen können. Ohne eine helfende Hand wären auch Uranus und Neptun nie zu ihrer heutigen Größe angewachsen: Bei den gewaltigen Entfernungen, die sie zur Sonne haben, wachsen Planeten ohne solche Hilfe so langsam, dass die Scheibe sich längst auflöste, bevor die Planeten zu voller Größe gedeihen konnten.

Woher kommt diese positive Wirkung der Planeten der ersten Generation? Zum einen akkumuliert an dem äußeren Rand der Lücke, die sie in der Scheibe erzeugen, viel Material. Andererseits können die ersten Gasriesen ihre benachbarten Planetesimale mittels Schwerkraft ins äußere System schleudern, wo diese sich zu neuen Planeten entwickeln.

Die Planeten der zweiten Generation entstehen aus dem Material, das die Gasriesen der ersten Generation für sie einsammeln. Das Timing dabei ist äußerst wichtig, selbst kleine Abweichungen auf der Zeitskala können zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bei Uranus und Neptun akkumulierten die Planetesimale so rasch, dass diese sich bereits negativ auf den Endzustand auswirkte. Ihre Planetenkeimlinge wurden außergewöhnlich groß und wuchsen auf zehn bis zwanzig Erdmassen an, wodurch sich die Akkretion des Gases verzögerte.

Als sie dann endlich damit begannen, Gas anzuziehen, war kaum noch welches übrig. Uranus und Neptun banden daher nur etwa eine Gasmenge entsprechend zweier Erdmassen an sich. Diese beiden Körper sind weniger Gas-, sondern eher Eisriesen – womöglich der häufigere Typ unter den Riesenplaneten.

Die Planeten der zweiten Generation üben selbstverständlich auch eine Schwerkraft aus.

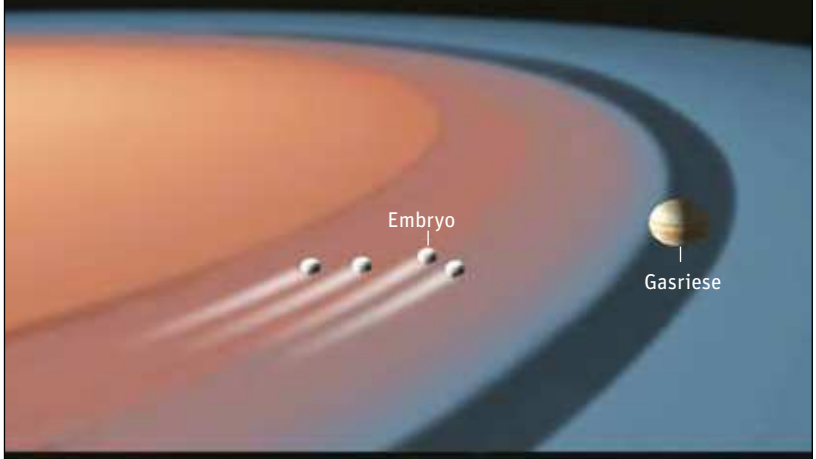
Phase 6: Die Familie vergrössert sich

Der erste Gasriese fördert die Geburt weiterer Planeten. Die Lücke, die der Erstling in der Scheibe erzeugt, wirkt wie ein Burggraben, den einwärtsdriftende Gas- und Staubmassen nicht überqueren können. Deshalb sammelt sich die Materie an den äußeren Rändern der Lücke und fügt sich dort zu einem neuen Trabanten zusammen.

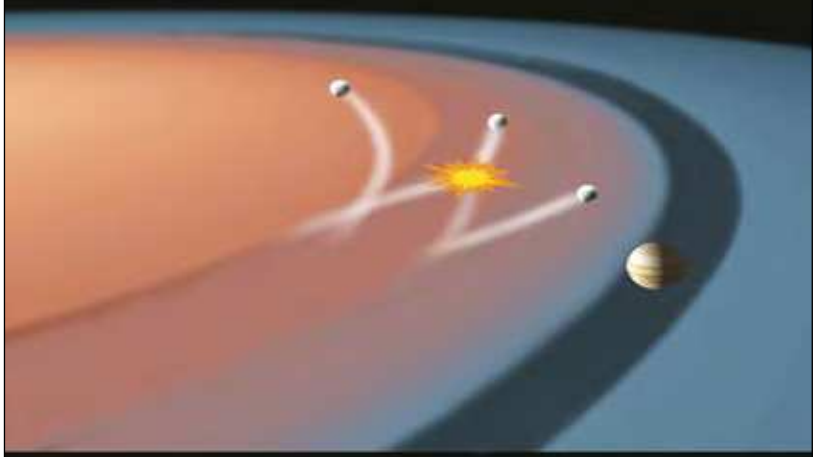
*Jupiterähnliche Planeten sind die letzten Mohikaner **vieler Generationen** von Planetenkeimlingen*

Phase 7: Kein Zirkelschluss

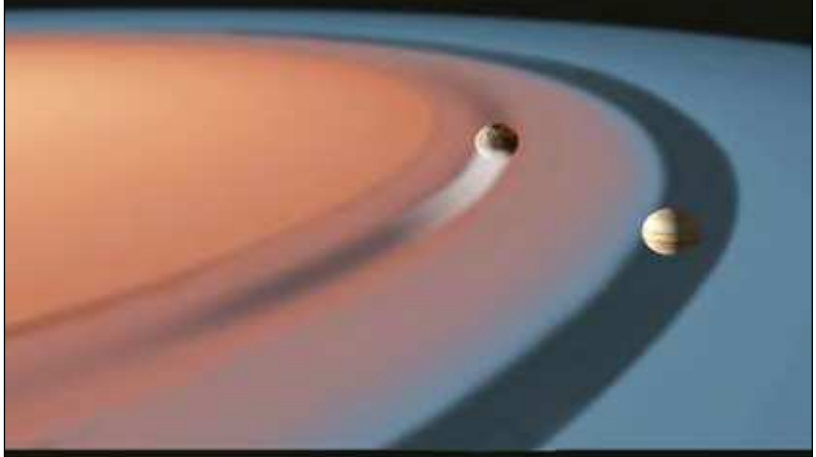
Im inneren Sonnensystem können die Planeten nicht durch Gasanlagerung wachsen, sondern müssen miteinander kollidieren und verschmelzen. Voraussetzung dafür ist, dass sich ihre Umlaufbahnen kreuzen – und das wiederum geht nur, wenn irgendetwas sie stört und aus ihren anfänglichen kreisförmigen Umlaufbahnen drängt.



Wenn Planetenkeimlinge entstehen, haben sie kreisförmige oder nahezu kreisförmige Umlaufbahnen, die sich nicht kreuzen.



Wechselwirkungen zwischen den Keimlingen oder mit einem der Riesenplaneten bringen ihre Bahnen durcheinander und lassen sie eventuell kollidieren.



Ein erdähnlicher Planet ist entstanden. Allmählich schwenkt er wieder auf eine kreisähnliche Umlaufbahn ein, indem er die übrigen Planetesimale aus der Bahn wirft.

Entstehen sie zu dicht beieinander, können sie in hoch elliptische Umlaufbahnen katapultiert werden. In unserem Sonnensystem haben alle Planeten heute nahezu kreisförmige Bahnen und einen so großen Abstand untereinander, dass sie gegenüber ihren gegenseitigen Schwerkrafteinflüssen bis zu einem gewissen Grad immun sind. In anderen Systemen sind jedoch elliptische Umlaufbahnen die Norm. Manche von ihnen weisen resonante Bahnen auf; das heißt, die Umlaufzeiten der Planeten stehen zueinander in einem ganzzahligen Verhältnis. Es ist höchst unwahrscheinlich, dass dies von Anfang an schon der Fall war. Vermutlich hat sich der resonante Zustand nach und nach eingestellt, indem die Planeten so lange gedriftet sind, bis sie untereinander gravitativ gekoppelt waren. Der Unterschied zwischen diesen Planetensystemen und unserem liegt womöglich schlicht in der anfänglichen Menge des Gases in der protoplanetaren Scheibe.

Ergebnis: eine geschlossene Gesellschaft von Riesenplaneten

7. Erdähnliche Planeten fügen sich zusammen

Zeit: zehn bis hundert Millionen Jahre

Planetenforscher vermuten, dass auch bei anderen Sternen erdähnliche Trabanten häufiger vorkommen als Gasriesen. Während die Reifung von Gasplaneten ein sensibles Gleichgewicht konkurrierender Effekte voraussetzt, sollte die Entstehung von Gesteinsplaneten ziemlich stabil gegenüber Störungen sein. Freilich: Solange wir noch keine extrasolaren Geschwister der Erde entdeckt haben, steht uns für diese Frage lediglich unser Sonnensystem als Untersuchungsobjekt zur Verfügung.

Die vier terrestrischen Planeten bestehen hauptsächlich aus Stoffen mit hohen Siedepunkten, zum Beispiel Eisen oder Silikaten. Das weist darauf hin, dass sie innerhalb der Schneegrenze entstanden und anschließend nicht wesentlich gedriftet sind. Derart nah an ihrem Stern wachsen Planetenkeimlinge in einer Gasscheibe aber nur bis auf ungefähr 0,1 Erdmassen an – also bis etwa auf Merkurgröße. Um noch größer zu werden, müssen die jungen Trabanten miteinander kollidieren und verschmelzen, was voraussetzt, dass sich ihre Umlaufbahnen kreuzen. Das ist tatsächlich kein großes Problem: Nachdem das Gas in der Scheibe von der Strahlung des Sterns weggeblasen wurde, destabilisieren sich die Planetenkeimlinge gegenseitig, wodurch ihre Umlaufbahnen nach und nach immer elliptischer werden. Nach ein paar Millionen Jahren überschneiden sie sich schließlich, was zur Kollision führen kann.

Viel schwieriger zu erklären ist, wie sich das System anschließend erneut stabilisierte und die terrestrischen Planeten auf ihre heutigen, nahezu kreisförmigen Bahnen gelangten. Eine kleine Restmenge an Gas könnte das bewerkstelligt haben – allerdings hätte sie auch von vornherein verhindert, dass die Umlaufbahnen der Trabanten instabil werden. Eine These lautet, dass zu dem Zeitpunkt, als die Planeten fast vollständig Gestalt angenommen hatten, immer noch zahlreiche Planetesimale herumschwirrten. Innerhalb der folgenden hundert Millionen Jahre – so die These – verleibten sich die Planeten einige dieser Planetesimale zusätzlich ein und lenkten die restlichen per Impulsübertrag in die Sonne. Dabei glätteten sich die Umlaufbahnen der Trabanten immer mehr, bis sie am Ende fast kreisförmig waren.

Eine andere Idee räumt Jupiter eine gestaltende Rolle ein. Radiometrische Daten legen nahe, dass die Asteroiden früh entstanden (vier Millionen Jahre nach der Sonne), gefolgt vom Mars (10 Millionen Jahre) und der Erde (50 Millionen Jahre) – als ob der Jupiter eine Welle angeregt hätte, die durchs Sonnensystem lief.

Dennoch glauben die meisten Planetenwissenschaftler nicht, dass Jupiter eine dominierende Rolle spielte. Um die meisten sonnenähnlichen Sterne kreisen keine jupiterähnlichen Planeten – und trotzdem haben diese Sonnen Staubscheiben, in denen es wahrscheinlich Planetesimale und Planetenkeimlinge gibt, die sich zu erdähnlichen Welten zusammenfügen könnten. Eine der wichtigsten Fragen, die bei künftigen Beobachtungen geklärt werden müssen, lautet: Wie viele Planetensysteme haben terrestrische Trabanten, aber keine jupiterähnlichen?

Unsere Erde erlebte einen kritischen Moment, als dreißig bis hundert Millionen Jahre nach Entstehung der Sonne ein marsgroßer Himmelskörper mit der Protoerde zusammenkrachte. Dabei wurden riesige Mengen an Staub und Schutt ins Weltall geschleudert, die später zum Erdmond zusammenklumpten. Dass es zu dieser Megakollision kam, ist im Grunde nicht verwunderlich, schließlich trieben damals eine Unmenge von Himmelskörpern durchs junge Sonnensystem. Deshalb existieren vermutlich auch in anderen Planetensystemen erdähnliche Trabanten, die Monde besitzen. Bei kosmischen Zusammenstößen solcher Dimensionen verdampft die dünne, ursprüngliche Gashülle der beteiligten Objekte. Die heutige Atmosphäre der Erde besteht hauptsächlich aus Gas, das einst in den Planetesimalen gefangen war, aus denen unser Planet entstand. Später wurde dieses Gas von Vulkanen freigesetzt.

Resultat: terrestrische Planeten

8. Letztes Reinemachen im Sonnensystem

Zeit: 50 Millionen bis eine Milliarde Jahre

Das Planetensystem hat sich nun fast vollständig entwickelt. Noch lenken die Gasriesen mit ihrer Schwerkraft fortwährend übrig gebliebene Planetesimale aus deren Bahn.

In unserem Sonnensystem katapultierten Uranus und Neptun die Planetesimale entweder hinaus in den Kuipergürtel oder nach innen in Richtung Sonne. Jupiter mit seiner dominierenden Gravitation schleuderte diese Minikörper bis in die Oortsche Wolke, weit draußen am äußersten Rand der solaren Einflusszone. Die Oortsche Wolke könnte Materie in der Größenordnung von hundert Erdmassen – einer Saturnmasse – enthalten. Dann und wann verirrt sich ein Planetesimal aus dem Kuipergürtel oder der Oortschen Wolke ins Innere des Systems und umrundet als Komet die Sonne.

Während sie die Planetesimale aus der Bahn werfen, wandern die Planeten selbst ein wenig – ein Effekt, der erklären würde, warum die Umlaufbahnen von Neptun und Pluto synchron verlaufen (siehe »Schwerkraft-Billiard im Sonnensystem«, Spektrum der Wissenschaft 11/1999, S. 32). Der Saturn zum Beispiel könnte einst näher an der Jupiterbahn gekreist haben und erst später nach draußen gewandert sein, wodurch er die »späte schwere Einschlagphase« (*late heavy bombardement*, LHB) mit verursachte. Das LHB war eine Periode mit zahlreichen Meteoriteneinschlägen, die etwa 800 Millionen Jahre nach Entstehung der Sonne auftrat. Sie ist in den großen Einschlagkratern auf dem Mond gut dokumentiert. In einigen Systemen können sich später sogar Megakollisionen zwischen fertigen Planeten ereignen.

Resultat: das fertige Sonnensystem

Kein »Großer Plan«

Vor der Entdeckung der Exoplaneten kannten die Astrophysiker nur unser eigenes Planetensystem. Inzwischen kennen wir eine erstaunliche Vielfalt planetarer Welten. Wir lernten, dass Exoplaneten die jeweils letzten Überlebenden darstellen. Dass unser Sonnensystem einigermaßen aufgeräumt wirkt, spiegelt also keinen »Großen Plan« wider.

Bis jetzt haben die Astronomen nur Planeten von Jupiter- oder Neptunformat entdeckt, die um sonnenähnliche Sterne kreisen. Mit neuen Superteleskopen werden sie zunehmend auch erdähnlichere Trabanten aufspüren können. Die Planetenforscher haben vermutlich erst begonnen, die Vielfalt der planetaren Welten in diesem Universum zu erkunden. ◁

Douglas N. C. Lin wurde in New York geboren, wuchs in Peking auf, besuchte die McGill University in Montreal (Kanada), promovierte an der University of Cambridge (England), war Postdoc an der Harvard University und ging dann an die University of California, Santa Cruz. Er ist Gründungsdirektor des Kavli-Instituts für Astronomie und Astrophysik der Universität von Peking. Als begeisterter Schifahrer kann er auf persönliche Erfahrungen mit Eiskörnchen und Schneegrenzen zurückgreifen.

Ida, S., Lin, D. N. C.: Towards a Deterministic Model of Planetary Formation. In: Astrophysical Journal, Heft 604, Nr. 1, S. 388 – 413, März 2004. http://arxiv.org/abs/astro-ph/0312144v1

Klahr, H., Brandner, W. (Hg.): Planet Formation, Theory, Observation, and Experiments. Cambridge University Press, 2006.

Eine aktuelle Zusammenstellung der bisher entdeckten Exoplaneten findet sich unter http://exoplanet.eu.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951058.

BLICKWINKEL, H. BREHM

Laufen = Fliegen = Schwimmen

Die Fortbewegungsarten von Vierbeinern, Vögeln und Fischen muten höchst unterschiedlich an. Doch gemäß einer neuen »konstruktalen« Theorie unterliegen sie einheitlichen Gesetzen.

In Kürze

- Die **konstruktale Theorie** untersucht, wie belebte und unbelebte Systeme von selbst aus Hindernissen – Imperfektionen – optimale Fließ- und Bewegungsformen entwickeln.
- Für den **Zusammenhang zwischen Körpermasse und Bewegungsparametern** folgen daraus allgemein gültige Formeln; sie gelten nicht nur für alle Tiere, sondern sogar für Maschinen und hypothetische Lebensformen.

Von Adrian Bejan und James H. Marden

Wie der amerikanische Paläontologe und Evolutionsforscher Stephen Jay Gould (1941 – 2002) behauptete, würde die Evolution, könne man ihre Uhr ganz zurückdrehen und sie noch einmal von vorn beginnen lassen, die heutige Erde mit völlig andersartigen Lebewesen bevölkern. Goulds Begründung: Welche Organismen überleben und sich im Lauf der Erdgeschichte entwickeln, hängt weit gehend vom Zufall ab. Das stimmt wohl, aber vielleicht gibt es dennoch gewisse Grenzen – einige allgemeine Konstruktionsprinzipien, welche die möglichen Lebensformen einschränken. Die natürliche Selektion bevorzugt offenbar manche Gebilde gegenüber anderen. Aber wodurch funktionieren gewisse Bautypen besser? Gibt es umfassende Leitlinien dafür?

In dieser Frage vermag vielleicht die Ingenieurwissenschaft, insbesondere die Thermodynamik, der Biologie weiterzuhelfen. Jede Konstruktion – ob Gebäude, Maschine oder Tier – soll mit minimalem Energieaufwand maximalen Output liefern. Diese Optimierung lässt sich schon an der Verästelung von Flussläufen beobachten, an der Struktur der Lunge oder an dem Spaltmuster getrockneten Schlamms, aber auch am Querschnitt von Rohrleitungen oder Bachbetten. All diese Formen gewährleisten maximalen Materialdurchsatz mit möglichst geringem Widerstand.

Aus der Idee, die Maximierung des Durchflusses könne auch für die Gestalt natürlicher –

JILL FROMER / ISTOCKPHOTO

CAROL BUCHANAN / FOTOLIA

belebter wie unbelebter – Fließsysteme verantwortlich sein, hat einer von uns (Bejan) die so genannte konstruktale Theorie entwickelt. Sie besagt einfach ausgedrückt: Jedes endliche System kann nur dauerhaft bestehen, wenn es sich so entwickelt, dass es den hindurchströmenden Flüssen immer leichteren Zugang verschafft.

Ein Fluss ist ein Gleichgewichtszustand aus Gebieten mit hohem und niedrigem Widerstand. Dies wird erreicht durch eine optimale Verteilung von Störungen, Hindernissen, Fehlstellen oder Konstruktionsmängeln – fachsprachlich Imperfektionen – derart, dass möglichst viele Punkte des Gebiets möglichst gleichmäßig belastet werden. Um diese optimale Balance der verschiedenen Widerstände zu erreichen, muss das Material auf bestimmte Weise verteilt sein.

Zum Beispiel gestaltet sich ein Flussbett von selbst so um, dass das Wasser mit immer geringerem Widerstand zur Flussmündung gelangt. Die Verästelung eines voll entwickelten Flusslaufs ist die am leichtesten zugängliche Konfiguration, die eine unendliche Anzahl von Punkten – das Wassereinzugsgebiet – mit einem Punkt verbindet.

Optimierung ist eine alte Idee und ein noch älteres Naturphänomen. Unser Beitrag besteht nun darin, ihre Erforschung einem einzigen Prinzip zu unterwerfen. Das hätte schon vor einem halben Jahrhundert geschehen können. Stattdessen verfolgte die moderne Physik – etwa die Teilchenphysik – einen Kurs, der auf dem Prinzip infinitesimaler lokaler Wirkungen beruhte. Die konstruktale Theorie zielt in die andere Richtung: Sie ist

Antilope, Zugvogel und Haifisch überwinden Entfernungen auf ganz verschiedene Weise. Doch physikalisch betrachtet fließt in jedem Fall eine bestimmte Masse von einem Ort zum anderen. Die Thermodynamik untersucht Fließsysteme, in denen Masse unter möglichst geringem Energieaufwand möglichst weit transportiert wird. Aus diesem Ansatz haben die Autoren die konstruktale Theorie entwickelt, die grundlegende Gemeinsamkeiten zwischen allen Fortbewegungsarten aufzeigt.

Der konstruktalen Theorie zufolge kann ein endliches System nur dauerhaft bestehen, wenn es den hindurchströmenden Materialflüssen möglichst leichten Zugang verschafft. Eine für viele Systeme optimale Konfiguration ist eine verästelte Baumform, die eine unendliche Anzahl von Punkten mit einem Quellpunkt verbindet. Die Falschfarben-Satellitenaufnahme zeigt das Delta des Flusses Lena in Sibirien (links); ähnlich aufgefächert wie die Quellgebiete großer Flüsse sind gewisse Korallen. Die Computersimulation des Elektronenflusses durch ein zweidimensionales Gebiet mit unterschiedlichem elektrischem Potenzial erinnert an geschmolzenen Schnee, der am Berghang Wege des geringsten Widerstands sucht (rechts).

ein Mittel, um makroskopische Eigenschaften, Richtwerte und Verhaltensweisen zu erklären.

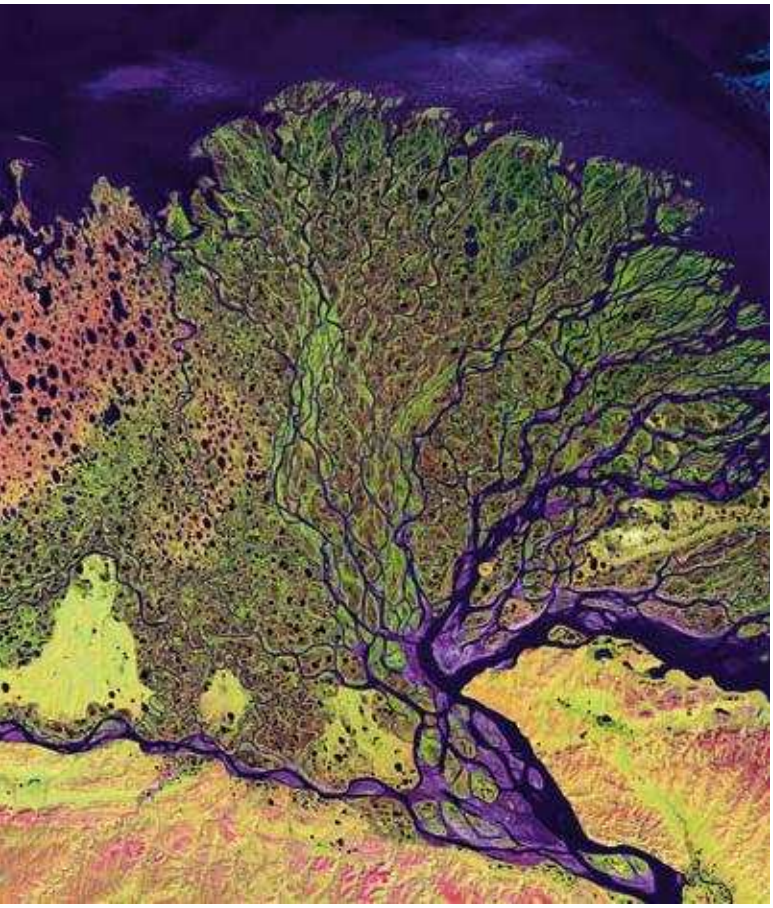
Ihr liegt eine einfache Idee zu Grunde, aber sie vermag unterschiedliche Gebiete außerhalb der Physik zu befruchten, insbesondere die Biologie. Fortbewegung lässt sich als Massenfluss von einem Ort zum anderen betrachten. Tiere bewegen sich auf der Erdoberfläche wie Bäche, Winde und Meeresströmungen. Sie suchen und finden Wege und Rhythmen, die ihnen ermöglichen, ihre Masse unter Verbrauch nutzbarer Energie über möglichst große Strecken zu bewegen, während sie zugleich thermodynamische Imperfektionen, beispielsweise die Reibung, minimieren. Tiere bewegen sich für unterschiedliche Zwecke auf unterschiedliche Weise fort, aber auf die Dauer ist effektive Energienutzung entscheidend; darum sollte sich der Bauplan der meisten Tiere zu Fortbewegungssystemen hinentwickeln, die Entfernung pro Aufwand optimieren.

Die üblichen Analysen tierischer Fortbewegung beruhen auf empirischen Beziehungen: Man macht Beobachtungen und sucht dann ein dazu passendes Modell. Die konstruktale Theorie geht umgekehrt vor, indem sie mit physikalischen Zusammenhängen beginnt und daraus Struktur und Funktion ableitet. Sie sagt nicht nur voraus, welche Geschwindigkeit mit maximaler Reichweite einhergeht, sondern zugleich auch die Frequenz von Schritt, Flügel- oder Flossenschlag und die damit netto ausgeübte Kraft.

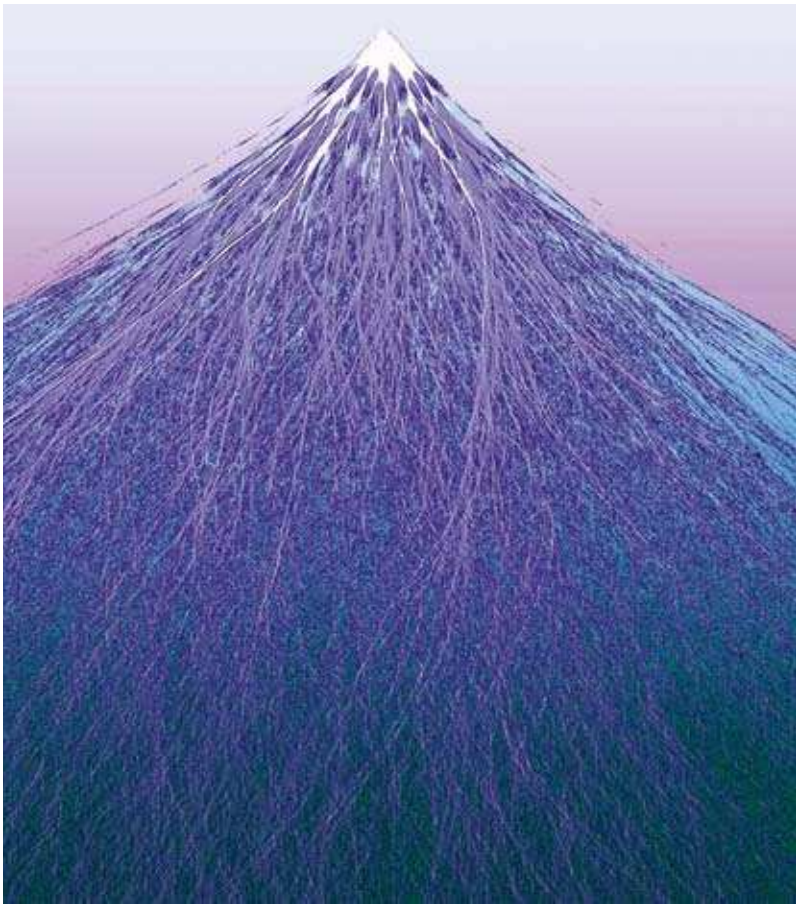
Diese Theorie will nicht sämtliche Formen biologischer Variation erklären. Sie behauptet nicht, alle Tiere müssten in vorhersehbarer Weise agieren oder gebaut sein, sondern nur, dass bei Lebewesen ganz unterschiedlicher Art und Größe vorhersagbare Grundtendenzen auftreten. Ökologische Faktoren werden oft nicht die Fortbewegungsarten mit optimaler Entfernung pro Aufwand fördern – etwa dann, wenn reichlich Energie zur Verfügung steht und das Risiko, von aktiven Raubtieren gefangen zu werden, hoch ist. Auch der Verlauf der Evolutionsgeschichte und der Zufallscharakter der Mutation können die für die Selektion verfügbare Bandbreite der Merkmalsvariation einschränken. Solche Faktoren bewirken gewisse Abweichungen von den theoretisch vorhergesagten Grundtendenzen.

Der Fluss der Tiere

Auf den ersten Blick sehen die Haupttypen der Fortbewegung – Laufen, Fliegen und Schwimmen – grundverschieden aus. Läufer und Flieger kämpfen mit ihrem Gewicht, während Schwimmer vom Auftrieb getragen



LINKS: USGS / NASA LANDSAT 7; RECHTS: AG FOCUS / SPL, ERIC HELLER

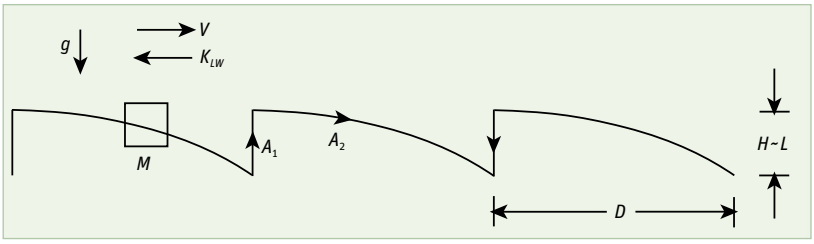


werden. Vogelflügel sind anders gebaut als Antilopenbeine und Fischschwänze. Das Flügelschlagen, die Sprünge eines Tiers auf der Flucht und das Schlängeln eines Fischkörpers haben wenig Ähnlichkeit. Vögel und Fische ziehen in gleichmäßiger Höhe oder Tiefe dahin, während Läufer eine hüpfende Bahn oder Trajektorie beschreiben. Ob der Körper beim Laufen immer wieder hart den Boden berührt oder sich an Luft und Wasser reibt, macht einen großen Unterschied. Hinzu kommt die große Vielfalt an Körpergröße, Form und Geschwindigkeit, die sogar bei einer einzigen Bewegungsform auftritt – man denke bloß an Vögel und Insekten.

Trotz all dieser Unterschiede haben Forscher starke funktionelle Gemeinsamkeiten gefunden. Die Schrittfrequenz laufender Wirbeltiere hängt näherungsweise ebenso von der Körpermasse M ab wie die Schwimmfrequenz von Fischen, nämlich gemäß $M^{-0,17}$. Die Geschwindigkeit laufender Tiere gehorcht annähernd derselben Beziehung zur Masse wie das Flugtempo von Vögeln, nämlich $M^{0,17}$. Und die von den Muskeln eines Läufers, Schwimmers oder Fliegers ausgeübte Kraft entspricht mit erstaunlich geringer Variationsbreite einem Wert von 60 Newton pro Kilogramm. Weitere Zusammenhänge bestehen zum Beispiel zwischen Körpergröße und Atemfrequenz.

Um diese einheitlichen Eigenschaften tierischer Organismen zu erklären, haben sich die Biologen auf einschränkende Faktoren konzentriert, etwa die maximale Schnelligkeit der Muskelkontraktion oder strukturelle Belastbarkeitsgrenzen. Die konstruktale Theorie schlägt einen anderen Weg ein: Sie geht nicht von Einschränkungen aus, sondern von allgemeinen Konstruktionszielen, aus denen sich Prinzipien für optimale Fortbewegungssysteme herleiten lassen. Auf diese Weise können wir die unterschiedlichsten Bewegungsformen auf gemeinsame physikalische Parameter zurückführen. Dies schließt andere Hypothesen, beispielsweise gemeinsame Einschränkungen, keineswegs aus; vermutlich bietet die konstruktale Theorie sogar eine Erklärung für solche Rahmenbedingungen. Die Theorie kann einen empirisch gewachsenen Wissensschatz herleiten, erklären und ordnen, indem sie Dauergeschwindigkeit, Frequenz und Kraftausübung von Laufen, Fliegen und Schwimmen unter einen Hut bringt.

Ein fliegender Vogel verbraucht nutzbare Energie auf zweierlei Art. Zum einen gibt es vertikalen Verlust: Da der Körper Gewicht hat, fällt er ein Stück, und der Vogel leistet Arbeit, um sich zurück auf die Flughöhe zu heben. Zweitens tritt horizontaler Verlust auf:



ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: AMERICAN SCIENTIST, STEPHANIE FREESE

Die Trajektorie eines fliegenden Tiers zeigt, welche Faktoren die konstruktale Theorie bei einer Analyse der Fortbewegung berücksichtigt. Die Sägezahnkurve entsteht, weil sich die Fluggeschwindigkeit *V* aus der Arbeit A_1 zur Überwindung des vertikalen Verlusts und aus der Arbeit A_2 gegen horizontalen Verlust zusammensetzt. A_1 ergibt sich aus Körpermasse *M* mal Gravitationskonstante *g* mal Höhenverlust des Körpers *H*, wobei dieser ungefähr der Körperlänge *L* entspricht. A_2 ist das Produkt aus der Kraft des Luftwiderstands K_{LW} und der pro Zyklus zurückgelegten Entfernung *D*.

Der Vogel leistet Arbeit, um gegen die Luftreibung voranzukommen. Keiner dieser Verluste lässt sich ganz vermeiden; doch sie können so ausbalanciert werden, dass ihre Summe ein Minimum erreicht. Diese optimale Verteilung der Imperfektion ist der Flug selbst.

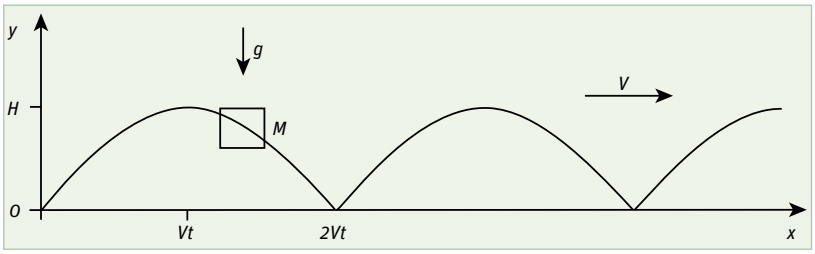
Formeln für den Vogelflug

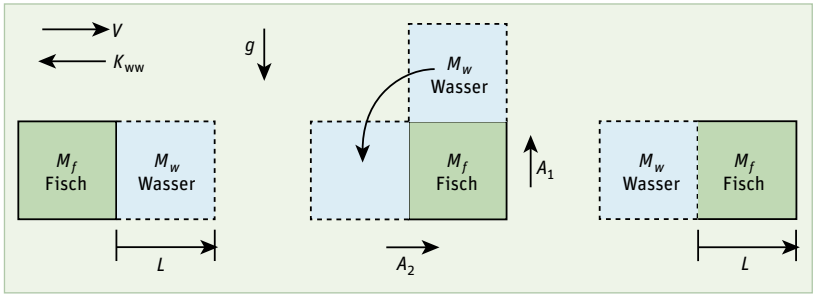
Fliegen ist keine stetige Bewegung in konstanter Höhe. Die Trajektorie bildet eine waagrechte Sägezahnkurve, wobei die Zahngröße vom Flügelschlag diktiert wird. Es entsteht ein optimierter Rhythmus, bei dem die Arbeit für das vertikale Anheben des Körpers auf diejenige für den horizontalen Vortrieb abgestimmt wird. Die Balance ist nötig, um zwei gegensätzliche Tendenzen auszugleichen: Mit wachsender Fluggeschwindigkeit nimmt der vertikale Energieverlust ab und der horizontale zu. Die Balance wird erreicht, indem der Vogel so mit den Flügeln schlägt, dass die Fluggeschwindigkeit gerade passt.

Von diesen Parametern ausgehend sagt die konstruktale Theorie voraus, dass die Fluggeschwindigkeit proportional zur Körpermasse hoch 0,17 sein sollte und die Flügelschlagfrequenz proportional zur Masse hoch –0,17. Diese Vorhersagen stimmen recht gut mit Beobachtungen unterschiedlichster Flugtiere überein.

Wir leiten diese Formeln algebraisch her, indem wir zahlreiche Ersetzungen aus be-

In der Trajektorie eines laufenden Tiers ist die Länge jedes Schritts proportional zur Laufgeschwindigkeit *V* mal der Zeit *t* für den reibungslosen Fall vom höchsten Punkt *H*. Nach der Formel für den freien Fall ist *t* gleich *H* durch *g* hoch 0,5. Schrittlänge und *H* entsprechen ungefähr der Körperlänge *L*, und die Körpermasse *M* ist annähernd gleich Körperdichte mal *L* zur dritten Potenz.





Um voranzukommen, muss ein Fisch Wasser aus dem Weg schaffen, und das Wasser kann nur nach oben ausweichen. Damit eine Körperlänge *L* mit der Geschwindigkeit *V* bewegt wird, muss der Fisch mit Körpermasse M_f eine entsprechende Wassermasse M_w aufwärts bewegen; diese vertikale Arbeit A_1 wird durch M_f mal *L* mal *g* angenähert. Im selben Intervall muss der Fisch die Arbeit A_2 leisten, um horizontal weiterzukommen; A_2 ist proportional zur Kraft des Wasserwiderstands K_{ww} und der pro Zyklus zurückgelegten Strecke, die der Körperlänge *L* entspricht. Die Wassermasse M_w nimmt den freien Platz hinter dem Fisch ein.

kannten Gleichungen vornehmen und alle Konstanten, die um weniger als eine Größenordnung von 1 abweichen – Werte zwischen 0,1 und 10 –, der Einfachheit halber weglassen.

Um beispielsweise zur Geschwindigkeitsformel zu gelangen, gehen wir davon aus, dass die konstruktale Theorie minimalen Gesamtarbeitsverlust pro zurückgelegtem Weg verlangt. Weg ist gleich Geschwindigkeit mal Zeit, und Zeit ist proportional zur Strecke, die der Körper unter dem Einfluss der Gravitation fällt, hoch 0,5. Die Fallstrecke lässt sich in Vielfachen der Körperlänge oder -höhe ausdrücken, die wiederum gleich Körpermasse durch Körperdichte hoch 0,33 ist. Die Körperdichte liegt für alle Tiere bei tausend Kilogramm pro Kubikmeter.

Die horizontalen Verluste sind größtenteils eine Folge der Luftreibung, die ihrerseits von der Luftdichte abhängt – näherungsweise ein Kilogramm pro Kubikmeter. Wenn wir all diese Faktoren für optimale Geschwindigkeit einsetzen, kommen wir auf eine Formel, die außer Konstanten nur die Körpermasse als Variable enthält, und zwar zum Exponenten 0,17. Ebenso haben wir gezeigt, dass die netto ausgeübte Kraft, die ein Tier produziert, um sich mit optimaler Geschwindigkeit zu bewegen, ein Vielfaches – in der Regel das Doppelte – seines Körpergewichts beträgt.

Allgemeine Theorie des Laufens

Wenn wir Laufen wie Fliegen behandeln – als optimierte periodische Bewegung im Schwerefeld –, können wir auch die Geschwindigkeit und Schrittfrequenz aller Läufer vorhersagen. Laufen ist eine Abfolge von Zyklen mit zweierlei Verlust. Der eine Verlust kommt vom Heben des Körpergewichts auf eine Höhe, die in etwa der Körperlänge – oder annähernd der Länge der Gliedmaßen – entspricht. Diese Arbeit macht den vertikalen Verlust aus, denn wenn der Körper aufsetzt, geht seine potenzielle Energie über die Beine und den Boden verloren; die elastische Speicherung beim Aufsetzen ignorieren wir der Einfachheit halber.

Der andere Verlust ist der horizontale: die Arbeit, die aufgewendet wird, um die Reibung gegen den Boden, die umgebende Luft und innere Körperteile zu überwinden. Auch hier betrachten wir zur Vereinfachung die gesamte Reibung als extern.

Vertikale und horizontale Verluste konkurrieren, und nur wenn sie einander ausbalancieren, ist ihre Summe minimal. Die optimierte Bewegungsfolge namens Laufen wird wiederum durch eine Geschwindigkeit proportional zu $M^{0,17}$ und eine Schrittfrequenz proportional zu $M^{-0,17}$ charakterisiert; das folgt aus einer ganz ähnlichen Herleitung wie für den Vorgang des Fliegens.

Die Vorhersagen dieser Theorie des Laufens sind sehr zuverlässig. Der horizontale Verlust mag dominiert sein von trockener Reibung an einer harten Oberfläche, von inelastischer Deformation einer weichen Unterlage

Eine Forelle schwimmt gegen schwache Strömung vorwärts und wird dabei durch eine dünne Angelschnur am Abtauchen gehindert. Die Anhebung der Wasseroberfläche durch den Fisch ist deutlich als Bogen am Kopfende sichtbar. Wenn der Fisch tiefer schwimmt, verteilt sich die Anhebung des Wasserspiegels über ein größeres Gebiet und lässt sich schwerer entdecken.

JAMES H. MARDEN

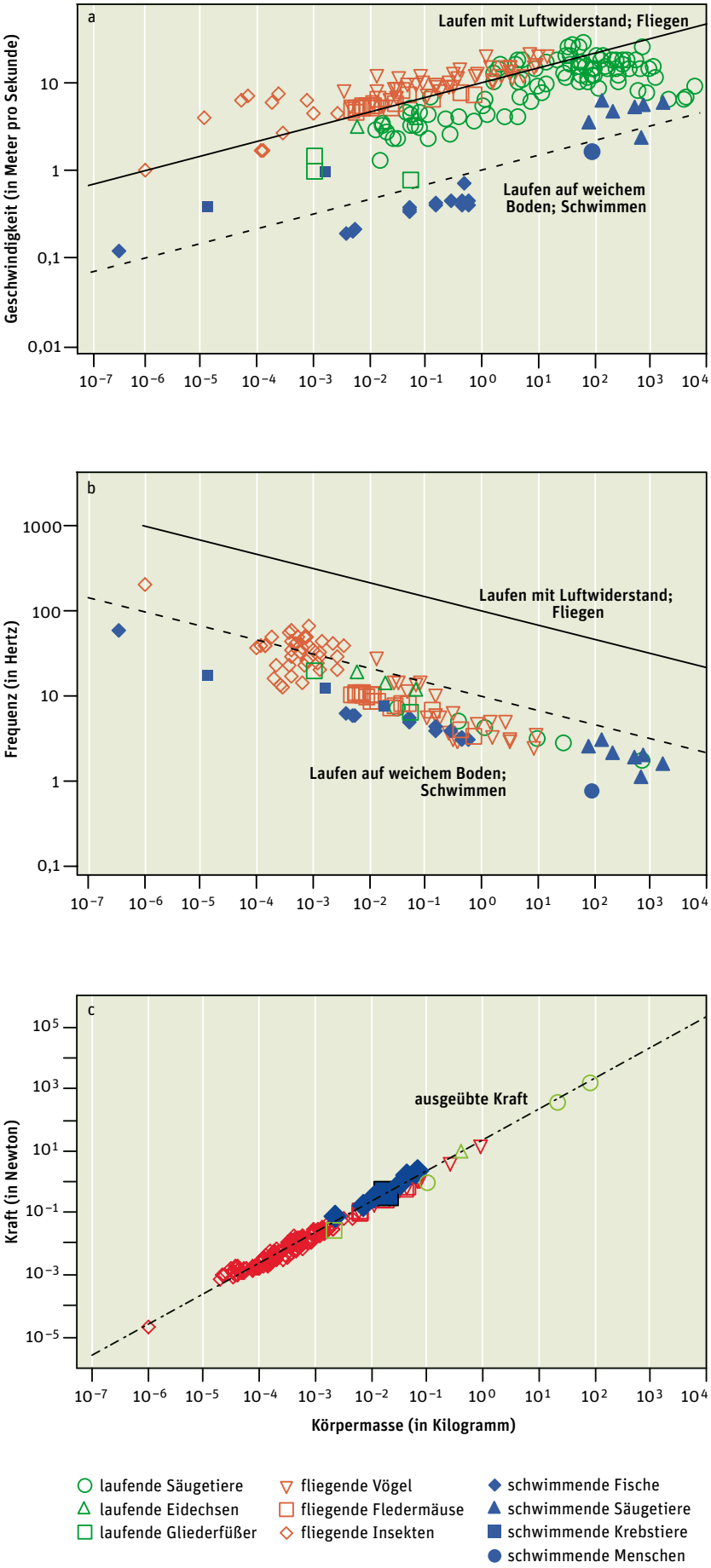
wie Sand, Schlamm oder Schnee oder vom Luftwiderstand. Doch all diese Effekte beeinflussen Geschwindigkeit und Frequenz in fast gleicher Weise. Wenn Luftwiderstand die dominante Ursache horizontalen Verlustes ist, weichen Geschwindigkeit und Frequenz nur um den Faktor zehn von den Werten für Laufen mit trockener Reibung und Bodendeformation ab.

Eine weitere Überraschung liefert die Berechnung der Arbeit, die für das Abheben des Körpers vom Boden aufzuwenden ist. Sowohl für Läufer als auch für Flieger sollte die im Mittel ausgeübte Kraft während eines Schritt- oder Schlagzyklus dem doppelten Körpergewicht entsprechen. Das stimmt mit Messungen von Kraft und Gewicht bei den unterschiedlichsten Körpergrößen überein – bei allen Tieren, die fliegen und laufen.

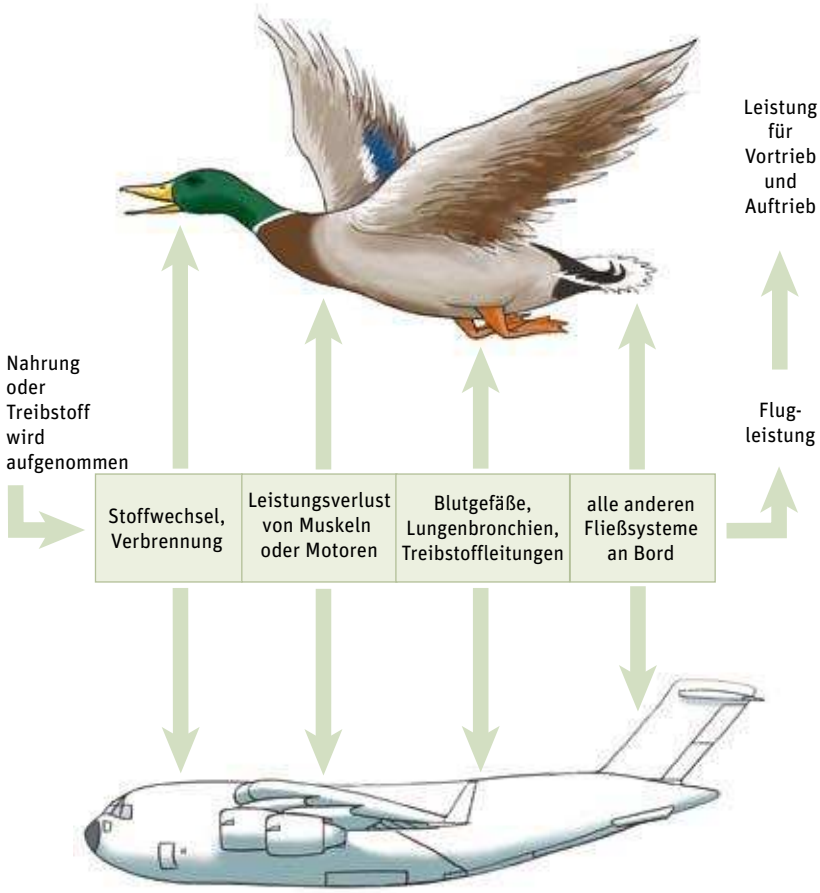
Die Arbeit der Fische

Was hat Schwimmen mit Laufen und Fliegen gemein? Auf den ersten Blick gar nichts, denn scheinbar müssen die im Wasser schwebenden Fischkörper nicht gegen die Schwerkraft ankämpfen. Diese Ansicht hat bisher die Entstehung einer physikalischen Theorie der Fortbewegung verhindert, die auch das Schwimmen einschließt.

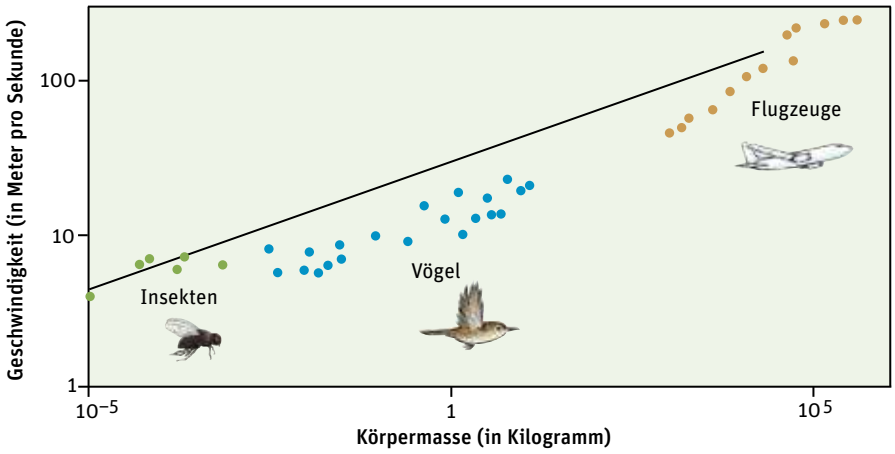
Obwohl Schwimmer und Flieger den Boden nicht berühren, bewegen sie sich eigentlich nicht anders fort als Läufer, denn letztlich trägt der Boden das Gewicht jedes über ihm befindlichen Körpers. Der Boden dient als Bezugsrahmen, von dem sich alle bewegten Körper abstoßen und ohne den es keine Fortbewegung gäbe. Da beim Schwimmen der Grund des Gewässers praktisch unermesslich groß ist und ruht, kann ein Fisch seinen Körper relativ zum Boden stoßweise bewegen, indem er – nicht anders als ein Vogel oder eine Antilope – gegen Schwerkraft und Reibung Arbeit verrichtet.



In diesen logarithmischen Diagrammen zeigen die durchgezogenen Linien die von der konstruktalen Theorie vorhergesagte Geschwindigkeit (*a*) oder Frequenz (*b*) in Abhängigkeit von der Körpermasse fliegender oder laufender Tiere, wenn der Boden fest ist und der Reibungsverlust deshalb praktisch nur durch den Luftwiderstand erzeugt wird. Die gestrichelten Linien zeigen die theoretischen Werte für Schwimmer oder Läufer auf weichem Boden; hier liefert die Bodendeformation den größten Reibungsverlust. Die gepunktete Linie in (*c*) zeigt die theoretisch ausgeübte Kraft in Abhängigkeit von der Körpermasse. Die Theorie stimmt gut mit den empirischen Daten für zahlreiche Tiere überein.



Gemäß der konstruktalen Theorie gehen alle Fließsysteme – auch Tiere und Maschinen – aus dem Widerstreit zweier Ziele hervor: Einerseits müssen Substanzen und Energie vom Kern zum Rand geschafft werden, andererseits sollen diese Substanzen und insbesondere die Wärmeenergie möglichst nicht in die Umgebung entweichen. Ein Vogel nimmt Nahrung – und ein Flugzeug Treibstoff – auf, um mit der daraus gewonnenen Flugleistung die Luftreibung durch Vortrieb zu überwinden und genügend Auftrieb für den Flug zu erzeugen (oben). Doch zwischen Treibstoffaufnahme und Leistungsabgabe geht Energie durch verschiedene Fließsysteme verloren.



Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Körpermasse, welche die konstruktale Theorie vorhersagt, gilt für Tiere und Maschinen (durchgezogene Linie im logarithmischen Diagramm). Die Punkte zeigen empirisch gemessene Werte für Insekten (grün), Vögel (blau) und Flugzuge (hellbraun).

Um horizontal um eine Körperlänge voranzukommen, muss der Schwimmer eine Arbeit leisten, die dem Anheben eines Wasservolumens von der Größe seines Körpers auf eine Höhe entspricht, die ungefähr gleich seiner Körperlänge ist. Diese Wassermenge muss angehoben werden, denn nur durch eine insgesamt vertikale Verschiebung kann Wasser um ein Tier oder ein anderes Objekt fließen. Wasser ist nicht komprimierbar, und der Boden unter dem Wasser bewegt sich nicht, also bleibt nur die deformierbare freie Oberfläche. Bei einem Körper, der sich an der Oberfläche bewegt, fällt das als Bugwelle sofort ins Auge, aber bisher wurde übersehen, dass diese vertikale Arbeit nicht vernachlässigt werden darf und die Physik des Schwimmens in jeder Tiefe bestimmt.

Theoretische Zahlenspiele mit empirischem Gewinn

Warum sehen wir nichts von dieser Deformation der freien Oberfläche, die jeder Fisch verursacht, indem er das Wasser über sich hebt, um waagrecht voranzukommen? Weil die meisten Fische klein sind und tief schwimmen. Das angehobene Wasservolumen verteilt sich über ein sehr weites Gebiet, das umso größer ist, je tiefer der Fisch seine Bahn zieht. Die Wölbung des Wasserspiegels wird nur augenfällig, wenn ein großer Fisch knapp unter der Oberfläche schwimmt (siehe Fotos S. 38). Dieser Effekt dient übrigens in der Militärtechnik zum Aufspüren getauchter U-Boote mittels spezieller Radarsysteme, die ein unter Wasser bewegtes Objekt an der veränderten Höhe des Meeresspiegels erkennen.

So fügt sich auch das Schwimmen in die konstruktale Theorie ein. Ihre Vorhersagen bezüglich Geschwindigkeit und Schlagfrequenz sind die gleichen wie für das Laufen auf deformierbarem Boden, und sie stimmen mit zahlreichen Daten überein.

Obwohl manche Tiere den Boden nicht berühren, nutzen sie ihn, um sich voranzubewegen. Der Flügelschlag des Vogels erzeugt Luftwirbel, die schließlich am Boden zur Ruhe kommen und den Druck vermehren, der auf dem Boden lastet. Das vom schwimmenden Fisch angehobene Wasser verursacht eine lokale Höhenzunahme der freien Oberfläche und steigert den Druck auf den Grund des Gewässers. Der Boden trägt letztlich alles, ungeachtet des Mediums, in dem dieses oder jenes Tier sich bewegt.

Wir verglichen die theoretisch hergeleiteten Werte für Geschwindigkeit, Schlag- oder Schrittfrequenz und Kraftausübung mit empirischen Daten für die unterschiedlichsten Tiere. Unsere einheitlichen Massenexponen-

ten beruhen auf der Annahme geometrischer Gleichheit; mit anderen Worten, wir idealisieren die Tierkörper zu mehr oder weniger vollkommenen Kugeln. Freilich müssen wir dafür statistisch signifikante Abweichungen von der Idealform in Kauf nehmen. Besonders weit entfernt sich die Flügelspannweite der Vögel von der geometrischen Norm. Da größere Flieger relativ längere Flügel haben, sollte ihre Flügelschlagfrequenz von der Körpermasse M mit einem negativeren Exponenten abhängen als gemäß unserer theoretischen Formel $M^{-0,17}$.

Im Allgemeinen variieren die empirischen Exponenten je nach untersuchter Tierart, unterschiedlicher Körperform, abweichender Methodik der Verhaltensstudien und statistischen Annahmen. Zwar finden wir keine lückenlose statistische Bestätigung für die theoretisch vorhergesagte Massenabhängigkeit, aber immerhin ausreichende Übereinstimmung. Die Daten weichen nicht mehr als eine Größenordnung von den Vorhersagen ab; das war nicht anders zu erwarten, da wir Konstanten zwischen 0,1 und 10 von vornherein ignoriert haben. Dieser Erfolg ist bemerkenswert, denn die Theorie nutzt für ihre Vorhersagen nur Dichte, Schwerkraft und Masse – ohne einen einzigen freien Parameter zur Anpassung an die Daten.

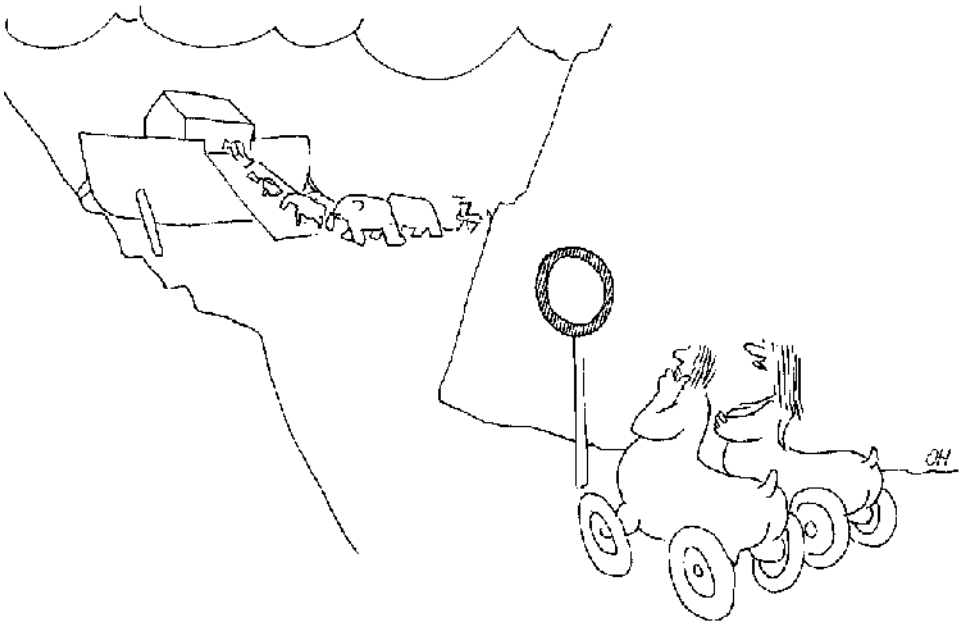
Offenbar vermag ein thermodynamischer Ansatz komplexe Eigenschaften des tierischen Körperbaus vorherzusagen. Darum glauben wir, dass die Evolution, wenn sie erneut Läufer, Schwimmer und Flieger hervorzubringen hätte, ihnen wieder dieselben Geschwindigkeiten, Schlag- oder Schrittfrequenzen und Kraft-Outputs verleihen würde. Die Theorie kann sogar vorhersagen, wie diese Eigenschaften sich auf fremden Planeten mit anderer Schwerkraft und anderen Gas- und Flüssigkeitsdichten entwickeln müssten.

Wie bewegen sich außerirdische Lebensformen?

Wenn Menschen sich auf unterschiedlichem Terrain bewegen, passen sie Geschwindigkeit und Schrittfrequenz entsprechend an. Bewusst oder unbewusst achten wir auf die Wirksamkeit unserer Bewegungsmuster, und vermutlich sind wir darauf programmiert, optimale Gangarten auszuwählen.

Als Astronauten auf dem Mond umhergingen, begegneten sie einer viel schwächeren Gravitation; es wäre interessant, zu wissen, wie gut ihre bevorzugte Geschwindigkeit und Sprungfrequenz zu den Vorhersagen unserer Theorie passen.

Die konstruktale Theorie gilt nicht nur für Tiere, sondern auch für Maschinen. Die Kraft-Masse-Relation eines technisch ausgereiften Motors trifft auch auf Läufer, Flieger und Schwimmer zu. Die Theorie des Vogelflugs sagt auch die Geschwindigkeit von Flugzeugen vorher; sie vereint Belebtes mit Unbelebtem.



Die Theorie kann darum helfen, effiziente Roboter zu konstruieren, die entlegene Winkel der Erde oder andere Planeten erkunden sollen. Sie nützt generell beim Bau jedes neuartigen Bewegungsapparats oder bei der Verbesserung bereits vorhandener Fortbewegungsmittel, indem sie einen Richtwert für wichtige Eigenschaften vorgibt, welche die Ingenieure spezifizieren müssen.

Beispielsweise werden Autoreifen bei jeder Umdrehung deformiert, wodurch ein vertikaler Energieverlust eintritt, während zugleich die Bodenreibung fortwährend horizontalen Verlust verursacht. Es wäre vielleicht lohnend, nachzuprüfen, ob der Reifenbau bereits optimiert wurde oder ob weitere Verbesserungen möglich sind. Eine eher spielerische Anwendung unserer Vorhersagen wäre, die Geschwindigkeit und Schrittlänge eines simulierten *Tyrannosaurus rex* so auszuwählen, dass er in einer Spielfilmszene möglichst realistisch ein Auto jagt.

Die konstruktale Theorie ist aus der Ingenieurwissenschaft hervorgegangen, und letztlich kehrt sie wieder dorthin zurück. Wenn wir das Prinzip kennen, dem die geometrische Form natürlicher Fließsysteme gehorcht, steigern wir unsere Fantasie als Konstrukteure und Erfinder. Mit der konstruktalen Theorie stützen wir unsere Erfindungen auf ein Prinzip, statt nur die Natur nachzuahmen – wir betreiben Konstruktion als Wissenschaft. ◁

Adrian Bejan (links) ist Professor für Maschinenbau an der Duke University in Durham (US-Bundesstaat North Carolina). Er promovierte 1975 am Massachusetts Institute of Technology. **James H. Marden** ist Biologieprofessor an der Pennsylvania State University. Er promovierte 1988 an der University of Vermont in Burlington.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Bejan, A., Marden, J. H.: Unifying Constructal Theory for Scale Effects in Running, Swimming and Flying. In: Journal of Experimental Biology, Bd. 209, S. 238 – 248, 2006.

Bejan, A., Marden, J. H.: Molecules, Muscles and Machines: Universal characteristics of Motors. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A., Bd. 99, S. 4161 – 4166, 2002.

Marden, J. H.: Scaling of Maximum Net Force Output by Motors Used for Locomotion. In: Journal of Experimental Biology, Bd. 208, S. 1635 – 6144, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943418.

LOGARITHMISCHE SKALEN

Geometrische Folgen und Pseudo-Einheiten

Die geometrische Folge und die von ihr abstammenden stetigen Funktionen log und exp erlauben die bequeme Beherrschung aller Größenordnungen, führen aber auch zu Pseudo-Einheiten, die teilweise den Laien mehr verwirren, als dem Experten zu nützen.

Von Norbert Treitz

Der Physiologe Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878) fand 1834, dass es für unser Wahrnehmungsvermögen in erster Linie nicht auf absolute Unterschiede, sondern auf relative ankommt: Ein Mensch kann zwei verschieden starke Reize R und $R+dR$ unterscheiden, wenn der Quotient dR/R (und nicht etwa die schlichte Differenz dR) einen gewissen Mindestwert überschreitet. Diese »relative differenzielle Reizschwelle« ist für verschiedene Arten der Wahrnehmung verschieden, für jeweils eine Wahrnehmung jedoch über weite Bereiche konstant: Tonfrequenz 0,003, Lichtstärke 0,016, Gewicht 0,019, Schall-Energiestromdichte 0,088. Das ist das Gesetz von Weber.

Später spekulierte Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887), dass es Empfindungsstärken gebe, die den Logarithmen der Reizstärken proportional seien. Das erklärt das Gesetz von Weber, wenn man zusätzlich unterstellt, dass wir zwei Wahrnehmungen unterscheiden können, wenn die Differenz der Empfindungsstärken eine gewisse Schwelle überschreitet. Das wird dann als Weber-Fechner-Gesetz bezeichnet und liefert eine – wackelige – Rechtfertigung dafür, dass wir in Akustik, Elektrotechnik, Fotografie und Astronomie logarithmische Skalen haben.

Wohlgemerkt: Gegen logarithmische Skalen ist im Prinzip nichts einzuwenden. Sie sind oft sehr nützlich; für die dazu passenden Quasi-Einheiten gilt das nicht immer.

Gewisse Größen nehmen Werte über viele Zehnerpotenzen hinweg an. Will man sie maßstäblich (»linear«) darstellen, reicht entweder das Papier für die großen Werte nicht, oder die kleinen schrumpfen so, dass sie im Nullpunkt verschwinden. Dagegen hilft die logarithmische Darstellung. Vereinfacht gesagt, gibt man statt der Zahlen nur noch deren Zehner-Exponenten an und bekommt damit alles in den Griff, was die Natur von Elementarteilchen bis zu Galaxienhaufen zu bieten hat. Man sollte nur nicht in den Fehler verfallen, den Logarithmus der Größe mit der Größe selbst zu verwechseln.

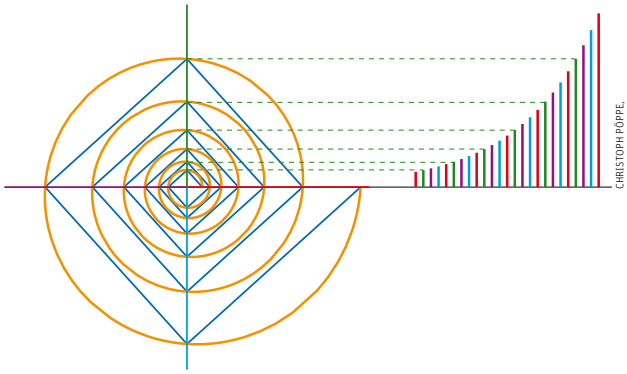
Was die logarithmische Skala für die grafische Darstellung, das ist für das materielle Bereitstellen einer Größe, die über einen großen Bereich variiert, die geometrische Folge. Das geläufigste Beispiel tragen wir in unserer Hosentasche mit uns herum: Die Werte der Münzen und Scheine sind in drei Schritten pro Zehnerpotenz abgestuft, aber vernünftigerweise nicht gleichmäßig, sondern gerundet und damit eingepasst in das Dezimalsystem. So unterscheiden sich zwei aufeinander folgende Geldwerte nicht durch

Der Höhensatz und die geometrische Folge

Wird die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks vom Höhenfußpunkt in die Teile p und q geteilt, gilt mit der Höhe h die Relation $p:h = h:q$. Das folgt aus der Ähnlichkeit der Teildreiecke und liefert eine bequeme zeichnerische Methode zur Ermittlung des »geometrischen Mittels« h aus p und q. Das arithmetische Mittel $(p+q)/2$ tritt hier als Radius des Thaleskreises auf.

Aus einem rechtwinkligen Dreieck macht man durch Drehstreckungen eine Folge ähnlicher Dreiecke. Es ist auch eine »geometrische Folge« im üblichen Sinn des Wortes, denn der Quotient aufeinander folgender Hypotenusen (die »Basis« der geometrischen Folge) ist konstant. Indem man in der geometrischen Folge $a_0 b^n$ für den Index n auch nichtganze Zahlen zulässt, kommt man zur Exponentialfunktion $y = b^x$ und ihrer Umkehrfunktion $x = \log_b(y)$.

Für die Basis b ist »von Natur aus« die Zwei als die – nach der Eins – kleinste natürliche Zahl die günstigste Wahl, weswegen die Computer sie so gerne verwenden. Zweierpotenzen wie 8 oder 16 wären als Basen ebenso geeignet und würden unseren Merkfähigkeiten wegen der geringeren Ziffernzahl entgegenkommen. Leider ist unsere Standardbasis 10 keine Zweierpotenz. Mickey Mouse oder die sterblichen Figuren aus den Simpsons (alle außer Gott) haben vier Finger inklusive Daumen an jeder Hand und hätten bei hinreichender Intelligenz (ich denke an Lisa) die Chance gehabt, statt des Dezimal- das Oktalsystem zu erfinden. Dagegen ist die Basis des »natürlichen« Logarithmus, die Zahl e, weder eine natürliche Zahl noch für unsere Zwecke besonders bequem.



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: NORBERT TREITZ

Als Faustregel für das Kopfrechnen ist $10^3 \approx e^7 \approx 2^{10}$ ausgesprochen hilfreich.

den Faktor $\sqrt[3]{10}$, sondern durch die Faktoren 2 (zweimal) und 2,5. Auch die Wägesätze verwenden die Zahlen 1, 2 und 5, benötigen die Zwei aber in doppelter Stückzahl, weil 5 mehr als das Doppelte von 2 ist.

Das ist nicht das sparsamste denkbare Sortiment an Wägestücken. Verzichten wir auf die Einbindung ins Dezimalsystem und fragen wir mit Claude Gaspar Bachet de Méziriac (1581–1638) nach einem Wägesatz aus möglichst wenig Stücken für eine zweischalige Waage ohne Skala, nur mit Gleichgewichtsmarke. Mit ihm soll man Pulver von allen »ganzzahligen« Gewichten von 1 bis n Einheiten abwiegen können. Man ist dann sogleich beim Binärsystem 1, 2, 4, 8, 16 …

Man legt die Stücke der Reihe nach – das schwerste zuerst – auf die Waage, schreibt eine Eins für jedes Stück, das liegen bleibt, und eine Null für jedes, das man wieder weglegen muss, weil die Waagschale mit den Wägestücken sich senkt: Das gibt die Binärzahl, die dem Gewicht des Pulvers am nächsten kommt. Ein elektrischer Analog-Digital-Wandler arbeitet im Prinzip ganz ähnlich. Umgekehrt kann man aus der Binärdarstellung ablesen, welche Gewichte man auflegen muss; so arbeitet ein Digital-Analog-Wandler.

So kann man mit sechs Stücken von 1 bis 32 alle Zahlen von 0 bis 63 erzeugen, mit m Stücken alle von 0 bis 2^m-1, und für alle Zahlen von 0 bis n braucht man die kleinste Anzahl, die nicht kleiner als $\log_2(n)$ ist.

Glühbirnen und andere Widerstände

Man kann Glühbirnen für 15, 25, 40, 60, 75, 100, 150 und 200 Watt kaufen. Das ist offenbar sinnvoller als 10, 20, 30, …, 190, 200, denn zwischen 10 und 20 braucht man eher eine Zwischenstufe als zwischen 190 und 200. Sieht man von der weniger gebräuchlichen 75-Watt-Birne ab, so hat man als »Stufen« Verhältnisse von rund 1,5 oder 1,6; für die Verzehnfachung von 15 bis 150 sind das fünf annähernd gleiche Faktoren. Genau gleiche hätten die fünfte Wurzel aus 10, das ist rund 1,58489. Die Leistungen der Glühbirnen folgen also mit einigen Rundungen einer geometrischen Folge der Basis $10^{0,2}$. Das ist offenbar sehr vernünftig, und man schreibt einfach die Leistungen im Klartext auf die Exemplare, so dass man die Grundrechenarten ohne Weiteres anwenden kann, wenn man mehrere Glühbirnen kombiniert.

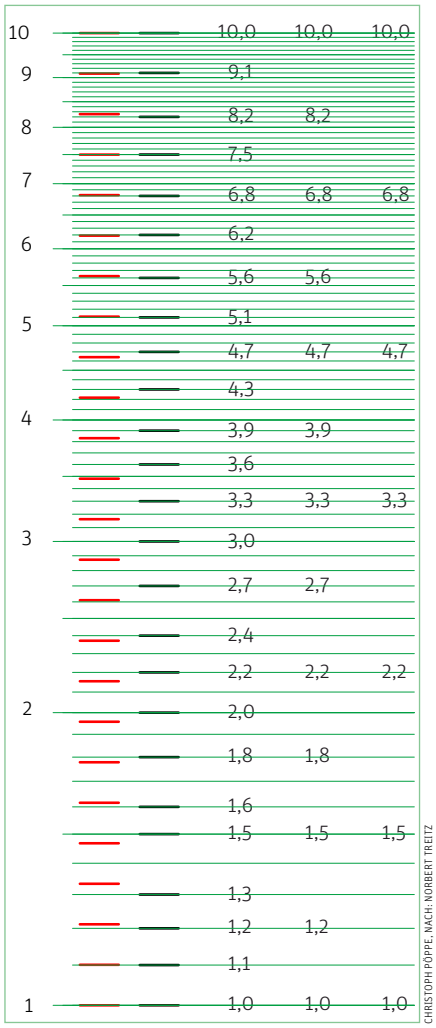
Elektrische Widerstände werden geliefert in Abstufungen gemäß der 6. oder 12. oder 24. Wurzel aus 10 als Basis, je nach der benötigten Genauigkeit. Immerhin bekommt man aus der Folge E12 bereits jeden gewünschten Wert auf rund 10 Prozent genau (Bild rechts). Auch hierbei werden die Werte im Klartext genannt, und der Laie wundert sich höchstens darüber, dass man 470 Ohm kaufen kann, aber nicht so leicht 500.

Ein Händler könnte sie durchnummerieren und in einem Katalog diese Nummern verwenden. Völlig unsinnig wäre es aber nun, wenn er nur noch diese logarithmischen Nummern auf die Birnen – oder Widerstände – und ihre Verpackungen schriebe und von den Kunden verlangte, sie statt der Leistungsangaben zu verwenden.

Macht denn wirklich jemand so etwas? Ja. Aber darauf komme ich später zu sprechen.

In der Musik wird die Zeit durch Bruchzahlen skaliert, und zwar weit gehend in Potenzen von 1/2, offenbar weil man leicht halbieren kann, die Zeit ebenso gut wie Wurststücke »nach Augenmaß«. Dass die kürzeren Noten dabei im Schriftbild durch mehr Fähnchen oder Balken bevorzugt werden, scheint unlogisch, ist aber praktisch, denn bei den zeitlich längeren und visuell unauffällige-ren hat man mehr Zeit hinzuschauen. Bei Teilungen in 3 oder 5 kleinere Einheiten (Triolen, Quintolen) werden allerdings die entsprechenden Ziffern eingefügt.

Als Nr. 12 eines Abschnitts »Allerlei Kunststücke« (KA 230) notiert Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) in einem seiner Sudelbücher: »Einen Format für Papier anzugeben, so daß Folio 4to und 8vo alle einander ähnlich werden.« Die traditionellen Bezeichnungen Quarto und Octavo deuten bereits an, dass bedrucktes Papier schon immer halbiert oder zu Hälften gefaltet wird. Lichtenbergs weiter gehende Forderung nach der geometrischen Ähnlichkeit führt sogleich auf die Wurzel aus 2 als Seitenverhältnis und damit – bis auf die Verankerung der Folge – auf die Norm DIN 476 (Walter Porstmann, 1922), heute ISO 216, bei der das Quadratmeter diese Verankerung bildet: Mit der Variable n hat



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: NORBERT TREITZ

Die Handelswerte für Widerstände folgen näherungsweise einer logarithmischen Skala. Rot die Werte einer fiktiven, perfekt logarithmischen Reihe, bei der jeder Widerstand $\sqrt[24]{10} = 1{,}10069$ Mal so groß ist wie sein Vorgänger.

das Blatt DIN An die Fläche $(0{,}5)^n$ m^2. Von normalem Schreibpapier mit den üblichen 80 g/m^2 kann man also bedenkenlos drei A4-Blätter in einen Standardbrief stecken, der mitsamt Umschlag 20 Gramm haben darf, denn ein Blatt ist ein Sechzehntel eines Quadratmeters und wiegt daher 5 Gramm.

Die Wurzel aus 2 begegnet uns auf den Fotokopierern als Verkleinerungs- und Vergrößerungsmaßstab, was Lichtenberg sicher noch nicht geahnt hat. Moderne Menschen schlagen sich nicht mit lateinischen Bezeichnungen von Zweierpotenzen herum, haben sich aber mit den DIN-Nummern angefreundet, teilweise sogar mit den zwischengeschalteten

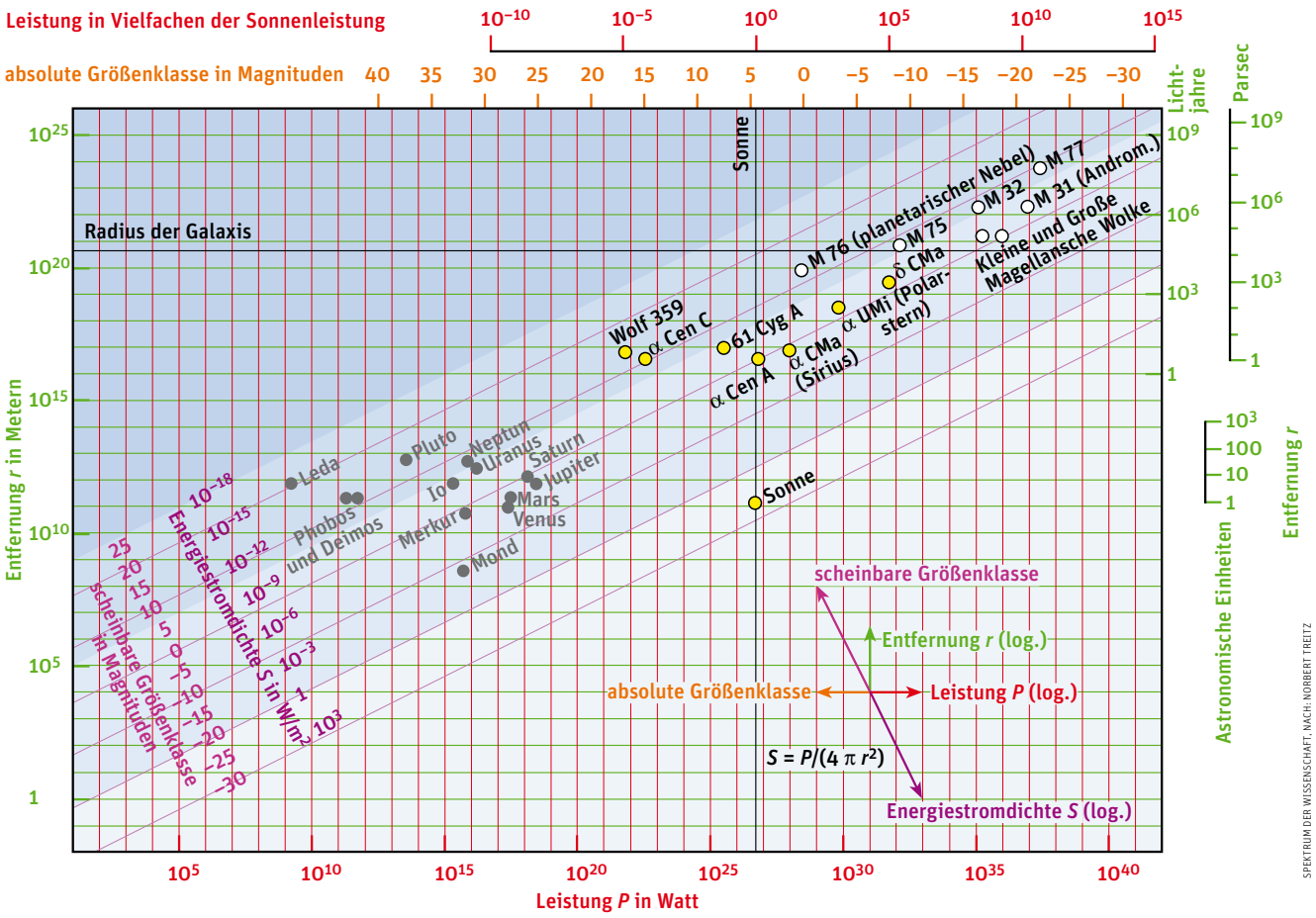
B- und C-Formaten für die Umschläge. Sie operieren also mehr oder weniger bewusst mit Logarithmen zur Basis 1/2.

In der klassischen (nichtdigitalen) Fotografie benötigt man je nach Filmsorte mehr oder weniger Licht für eine bestimmte Schwärzung. Bei gegebener Energiestromdichte am Objektiv ist die nötige Belichtungszeit in weiten Grenzen umgekehrt proportional zur Fläche der Blendenöffnung. Statt dieser Fläche wird aber am Gerät das Verhältnis von Brennweite zu Blendendurchmesser (und nicht etwa das vernünftigere umgekehrte Verhältnis) als »Blendenzahl« angezeigt. Feinkörnige Filme haben im Allgemeinen eine bessere räumliche Auflösung als gröbere, aber eine geringere Empfindlichkeit, man muss also für dasselbe Objekt länger belichten.

Für die Filmempfindlichkeit gibt es eine einfache Angabe: Bei 100 ASA braucht man doppelt so lange oder eine doppelt so große Blendenöffnung wie bei 200 ASA. Das ist so einfach wie bei den Glühbirnen, aber die Fotofachleute des deutschen Normenausschusses fanden das offenbar zu einfach: Wozu haben wir schließlich das Weber-Fechner-Gesetz gelernt, das ja auch irgendwie etwas mit dem Sehen zu tun hat? Jede Verdopplung wird durch eine Addition der Zahl 3 angezeigt, weil $\log_{10}(2)$ fast genau gleich 0,3 ist. Durch eine hochgestellte Null (wie ein Gradzeichen) deuten wir »Zehntel« an: 18^0 DIN entspricht 50 ASA, und 21^0 DIN gehört zu 100 ASA. Wozu also übersichtlich, wenn es auch anders geht? Heute stehen auf den Filmen beide Angaben nebeneinander, und man kann die völlig überflüssige logarithmische DIN-Angabe (mit ihrer Basis $10^{0,1}$) ganz einfach ignorieren.

Wie hell uns ein Stern erscheint, dafür ist – bei einiger Vereinfachung – entscheidend die auf der Erde ankommende Energiestromdichte, also (bis auf den Faktor 4π) Leistung durch Entfernungsquadrat. Seit der Antike unterscheidet man rund fünf Abstufungen, die *magnitudines* (»Größen«) heißen, was auf dreifache Weise ungeschickt oder antiintuitiv ist: Die Bezifferung erfolgt absteigend wie früher die der Schulklassen in altsprachlichen Gymnasien; die Bezeichnung unterstellt, dass alle Sterne gleich weit entfernt seien (das glaubte man in der Antike) und dass die Leistung eindeutig mit der Größe zu tun hat. Auch heute werden logarithmisch, und zwar zur Basis $0{,}01^{0,2}$, angegebene Werte der hier ankommenden Energiestromdichte als Magnitudines oder scheinbare Helligkeiten bezeichnet. Sirius, der für uns hellste Stern, hat die Magnitudo –1,46. Statt (sehr) vieler Worte zeigt das Bild unten den Zusammenhang verschiedener linearer und logarithmischer Maße für Längen, Leistungen und Energiestromdichten, die in der Astronomie vorkommen oder die sie (stattdessen) aus der allgemeinen Physik übernehmen könnte.

Kennt man die Entfernung des Sterns von unserem Sonnensystem, so kann



Astronomische Objekte und ihre energetischen Daten. Die Hintergrundfarben in diesem doppelt-logarithmischen Diagramm deuten Sichtbarkeit mit bloßem Auge und mit Fernrohren an. Die Farben der eingetragenen Punkte unterscheiden zwischen Galaxien, Sternhaufen, Sternen und den von der Sonne angestrahlten Planeten und Satelliten. Die Steigungen 1/2 und –2 ergeben sich aus Lamberts quadratischem Abstandsgesetz der Photometrie, also letztlich aus der Tatsache, dass unser Raum dreidimensional ist.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Exkurs: Ternäres balanziertes System

Bachet de Méziriac hat zu seiner Aufgabe noch eine weniger bekannte Variante gestellt: Welches ist der sparsamste Satz von Wägestücken, wenn diese auf jede der beiden Waagschalen gelegt werden dürfen?

Ein auf der Gegenseite – also bei der Last – aufgelegtes Gewicht zählt nun negativ, und wir kommen zu den drei Ziffern –1, 0 und +1, entsprechend den drei Möglichkeiten für jedes Wägestück, entweder links, rechts oder gar nicht aufgelegt zu werden. Also brauchen wir als Abstufung nur den großzügigeren Faktor 3 statt 2.

Das dazu passende Zahlensystem ist ein ternäres, aber nicht das gewöhnliche mit 0, 1 und 2, sondern das antisymmetrische (oder balanzierte) Ternärsystem, bei dem die 0 in der Mitte der verfügbaren Ziffern liegt. Das bringt den Vorteil mit sich, dass beim schriftlichen Rechnen die Überträge meistens sehr schnell wieder ausgeglichen sind. Es wurde sogar 1958 in der Sowjetunion ein Computer mit diesem Zahlensystem entwickelt.

man aus der hier ankommenden Energiestromdichte seine Leistung (den Energieausstoß pro Zeiteinheit) berechnen. Die »absolute Magnitudo« eines Sterns ist diejenige Magnitudo, die der Stern in der Standardentfernung 10 Parsec hätte; das ist die Entfernung, aus welcher der Erdbahnradius unter dem Winkel $\pi/(180 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10)$ (eine zehntel Bogensekunde) zu sehen wäre. Die Entfernung taucht bei einer solchen Rechnung auch als Logarithmus zur Basis $0{,}01^{0{,}2}$ (»Entfernungsmodul«) auf, nämlich als Differenz der absoluten und der scheinbaren Magnitudo.

Der Unterscheidung zwischen Zwergen (Hauptreihensternen), Riesen und Überriesen könnte man relativ treffend den Begriff der Größenklassen zuordnen, der ist aber leider schon vergeben, und so nennt man das – weit weniger treffend – Leuchtkraftklassen.

All die logarithmischen Raffinessen der Astronomie sind nicht messtechnisch, sondern allenfalls historisch und teilweise auch sinnesphysiologisch begründet. Sie sind für Berufsastronomen vermutlich ein erträglicher Zopf, aber für Amateure und erst recht für Schüler, denen man die Beschäftigung mit unserer Wunderwelt nahebringen möchte, völlig unnötige Hürden.

Noch vor wenigen Jahrzehnten waren die Logarithmen in einer ganz anderen Rolle sehr präsent: als Rechenhilfsmittel. Sechsstellige Zahlen »zu Fuß« zu addieren oder zu subtrahieren ist erheblich einfacher, als sie zu multiplizieren, zu dividieren oder gar zu potenzieren. Um das auszunutzen, erfanden John Napier (1550–1617) und Jost Bürgi (1552–1632) etwa gleichzeitig das logarithmische Rechnen: Statt Zahlen zu multiplizieren, addiert man deren Logarithmen. Entsprechend werden Dividieren, Potenzieren und Wurzelziehen durch die wesentlich bequemere Rechenoperation »eine Stufe tiefer« ersetzt. Man braucht nur eine Logarithmentafel, in der man zu jeder Zahl deren Logarithmus ablesen kann und umgekehrt. Das ganze Verfahren ist heute so überflüssig wie mechanische Präzisionsuhren des 18. Jahrhunderts und verdient ebenso wie diese unseren höchsten Respekt.

Wenn sich zwischen Mensa und Bibliothek kein Waschbecken mit Seife befindet oder nicht in wünschenswertem Umfang genutzt wird, kann das zu dem führen, was im antiquarischen Buchhandel »leichte Gebrauchsspuren« genannt wird. Wenn solche Fettflecken in einem Roman aus einer Leihbücherei bevorzugt am Anfang auftreten, kann man dem Autor vorwerfen, dass er keine weit reichende Spannung aufbaut. Eine Logarithmentafel liest man aber nicht von vorne bis zu der Stelle, an der die Langeweile übermächtig wird, sondern greift bei den benötigten Zahlen (Numeri) zu. Simon Newcomb (1835–1909) fand 1881 in einer Logarithmentafel eine derartige Häufung der Abnutzungserscheinungen bei den niedrigen Anfangsziffern. Kann man das erklären? Im nächsten Heft gehen wir der Sache weiter nach. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

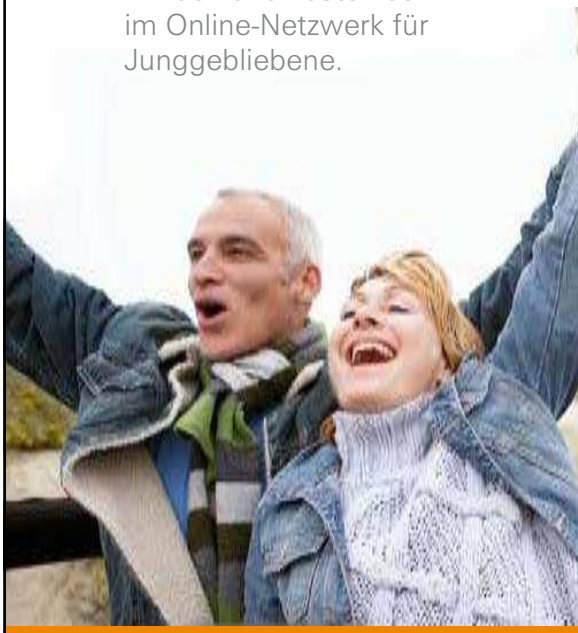
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951094.

Das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen

Knüpfen Sie Kontakte zu Menschen Ihrer Wellenlänge.

Tauschen Sie Wissen, Erfahrungen und Meinungen.

Einfach und kostenlos im Online-Netzwerk für Junggebliebene.



Jetzt mitmachen!

www.platinnetz.de

Platinnetz
Verbindungen leben.

EINE KURZE GESCHICHTE DER MENSCHLICHEN CHROMOSOMENZAHL

Selbst zwei Jahre nach Aufklärung der DNA-Struktur war die korrekte Zahl der menschlichen Chromosomen noch nicht bekannt. Eine 1956 publizierte Entdeckung leitete dann eine grundlegende Veränderung der Human- samt Zellgenetik ein.

Von Stanley M. Gartler

Gerechnet von der Wiederentdeckung der Arbeiten von Gregor Mendel im Jahr 1900[1–3] war die Genetik als Forschungsdisziplin 1956 etwa ein halbes Jahrhundert alt. Die formale Genetik mit ihren Mutationsanalysen sowie Kartierungs- und zellgenetischen Verfahren hatte sich bis dahin zu einer reifen Wissenschaft entwickelt; davon zeugten die Ergebnisse vor allem bei der Taufliege *Drosophila melanogaster* und bei Mais, teils auch bei einigen anderen Studienobjekten. Die Hypothese, ein Gen stehe für ein Enzym, die George Beadle und Edward Tatum aus Studien an dem Schimmelpilz *Neurospora crassa* abgeleitet hatten[4], war fast zwei Jahrzehnte alt. Und das Wichtigste von allem: Die Struktur der DNA, das Watson-Crick-Modell, war drei Jahre zuvor publiziert worden.[5] Das goldene Zeitalter der Genetik brach an.

Ganz anders stand es um die Humangenetik. Alles in allem war das Gebiet stark durch die früheren biometrischen Studien von Francis Galton[6] beeinflusst, der den Standpunkt vertrat, die mendelschen Regeln seien auf die menschliche Vererbung nicht anwendbar. Dennoch gab es einige Lichtblicke, darunter die Entdeckung des AB0-Blutgruppensystems durch Karl Landsteiner im Jahr 1901, das ein klassisches Beispiel für »mendelnde« menschliche Merkmale darstellt.[7] Landsteiner und seine Schüler entdeckten später auch den Rhesusfaktor und weitere Blutgruppensysteme, so dass Anfang der 1950er Jahre insgesamt neun unabhängige, nach den mendelschen Regeln vererbte Blutgruppensysteme bekannt waren. Einen weiteren wichtigen, jedoch kaum beachteten Beitrag leistete Archibald Garrod. In seinen Arbeiten zu angeborenen Stoffwechselfehlern, erkannt bei seinen Patienten, nahm er bereits 1909 die Ein-Gen-ein-Enzym-Hypothese vorweg.[8]

Im Jahr 1949 stellten Linus Pauling und seine Kollegen fest, dass menschliche Hämoglobin-Moleküle von Patienten mit Sichelzellanämie und von Gesunden bei der Elektrophorese, der Auftrennung im elektrischen Feld, unterschiedlich schnell wanderten. So konnten sie diese Anämie als »molekulare Erkrankung« charakterisieren.[9] Das Verfahren diente in der Folge auch zur molekularen Erforschung anderer Hämoglobin-Erkrankungen. In diesem Zusammenhang wurde zudem entdeckt, dass die Malaria als Selektionsfaktor die Häufigkeit des Sichelzellmerkmals beeinflusst.[10] Im Jahr 1955 beschrieb Oliver Smithies (2007 für eine andere Entwicklung mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, Anm. der Redaktion) die neuartige Technik der Stärke-Gelelektrophorese[11], was zur Entdeckung weiterer Varianten mit mendelschem Erbgang führte.

Gewisse Fortschritte verzeichnete um diese Zeit auch die formale Humangenetik; so wurde eine kleine Anzahl Kopplungsgruppen für nicht geschlechtsgebunden vererbte Merkmale beschrieben[12], ebenso die Kopplungsanalyse

nature REVIEWS GENETICS

Das englische Original dieses Artikels erschien unter dem Titel »The chromosome number in humans: a brief history« in »Nature Reviews Genetics«, Bd. 7, S. 655 – 659, 2006. Die Indexzahlen verweisen auf die Referenzen in der Literaturliste, zu finden unter www.spektrum.de/artikel/951086

mittels LOD-Scores *(Logarithm of the Odds)*[13]. Im Jahr 1956 war jedoch noch keine einzige einem bestimmten Chromosom zugeordnete Kopplungsgruppe bekannt, außer für das X-Chromosom.

Dies sollte sich rasch ändern. Denn noch im selben Jahr berichteten Joe Hin Tjio und Albert Levan, dass die korrekte Zahl der menschlichen Chromosomen 46 betrage[14] und nicht etwa 48, wie rund dreißig Jahre zuvor vermeintlich ermittelt. Die Bedeutung dieses Befunds lag nicht unbedingt in der Korrektur der Zahl an sich, sondern darin, dass man mit dem genutzten Verfahren nun zuverlässig 46 von 48 Chromosomen zu unterscheiden vermochte. Für Tjio und Levan wahrscheinlich unvorhersehbar, offenbarte sich dann beim Menschen ein erstaunliches Ausmaß an zytologischer Variation, die enorme Auswirkungen auf mehr als nur ein Gebiet der Humangenetik haben sollte.

Wie es begann

Erstmals beobachtet wurden Chromosomen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, nachdem sich Methoden der Fixierung und Färbung in der zytologischen Präparationstechnik etabliert hatten. Der Begriff »Chromosom« leitet sich von der Tatsache her, dass sich diese Strukturen auffällig anfärbten (griechisch *chroma* bedeutet »gefärbt«, die färbbare Substanz im Zellkern hieß bereits Chromatin). Mitosefiguren wurden erstmals sichtbar, und schon bald hatte man die verschiedenen Phasen der Kernteilung, der Mitose, bei Pflanzen und Tieren erarbeitet.[15] Mitosefiguren waren zwar auch bei menschlichen Zellen schon im späten 19. Jahrhundert beobachtet worden, doch dafür geeignetes Zellmaterial stand nicht ohne Weiteres zur Verfügung. Die ersten Untersuchungen daran galten zudem eher der Choreografie der Chromosomen während der Teilungsphasen als ihrer Zahl. Mit der Entwicklung der Chromosomentheorie der Vererbung[16,17], wonach diese Gebilde die Erbinformation einer Zelle tragen, und der Wiederentdeckung der mendelschen Arbeiten gewann allerdings die Bestimmung der Chromosomenzahl an Bedeutung. Es stellte sich nämlich heraus, dass sich verschiedene Spezies darin unterschieden.

Seit den ersten Versuchen einer Zählung beim Menschen in den 1890er Jahren hatten bis 1914 mindestens 15 Forscher darüber Eigenes publiziert.[18] Mit einer Ausnahme kamen sie alle auf eine niedrige Gesamtzahl: zumeist 24 für den diploiden, zweifachen Chromosomensatz. Diese einzige Ausnahme war Hans de Winiwarter; er berichtete 1912 von 47 Chromosomen in Hodenzellen und von 48 in Zellen fetaler Eierstöcke.[19] Damit kam der in Belgien lehrende Histologe dem tatsächlichen Wert recht nahe – offenbar weil er erkannt hatte, dass nur mit frischem Material und sofortiger Fixierung das Verklumpen des Chromatins zu vermeiden war. Sobald sich diese Erkenntnis durchgesetzt hatte, verschwanden die niedrigen Stückzahlen aus der wissenschaftlichen Literatur.

Einige Zeit lang glaubten allerdings manche Wissenschaftler, es gäbe eine natürliche Variation in der Anzahl beim Menschen. Da de Winiwarter Gewebeproben von Weißen verwendet hatte und einige der Zellen mit vermeintlich 24 Chromosomen von Schwarzen stammten, kam die Vermutung auf, Weiße besäßen die doppelte Menge. So absurd diese Annahme heute erscheint – selbst ein hochrangiger Genetiker wie Thomas H. Morgan zog eine solche Möglichkeit in Betracht und erwähnte sie in seinem Lehrbuch von 1914.[20] Als jedoch Theophilus Painter in den 1920er Jahren für Schwarze wie Weiße gleichermaßen eine Zahl von 48 publizierte, wurde die Idee verworfen, und die Ansicht, der Mensch habe 48 Chromosomen, setzte sich für die nächsten drei Jahrzehnte durch.

Painters Irrtum

Wenn irgendwem die Verbreitung einer falschen Angabe zur Anzahl menschlicher Chromosomen anzulasten ist, dann Painter (siehe Foto oben). Er war ein gut ausgebildeter Insektenzytologe, der sich auf die Erforschung der Spermatogenese – der Schritte zur Spermienbildung, beginnend mit den Ursamenzellen des Körpers – spezialisiert hatte. Nach seiner Promotion, 1913 an der Yale University in New Haven (Connecticut), hatte er ein Jahr bei Theodor Boveri an der Universität Würzburg gearbeitet, dem Mitbegründer der Chromosomentheorie der Vererbung und wohl besten Zytologen seiner Zeit. Painter kehrte mit einem Lehrauftrag nach Yale zurück und erhielt zwei Jahre später eine Stelle an der University of Texas in Austin. Dort blieb er für den Rest seines Lebens und war auch einige Jahre Präsident der Einrichtung.

CENTER FOR AMERICAN HISTORY, UNIVERSITY OF TEXAS-AUSTIN, THEOPHILUS SCHICKEL PAINTER COLLECTION; CN04909; FOTO UM 1950

Theophilus S. Painter (1889 – 1969) bestimmte Anfang der 1920er Jahre die Zahl menschlicher Chromosomen auf 48 – ein Irrtum, der sich Jahrzehnte hielt.

In Kürze

- **In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts** entwickelte sich die Genetik zu einer florierenden Wissenschaft.
- Dagegen lag die Zellgenetik unserer eigenen Spezies deutlich im Hintertreffen, durch den hartnäckigen Glauben, der Mensch besitze **48 Chromosomen**.
- Technische wie psychologische Faktoren behinderten den Fortschritt, bis **1956 die korrekte Zahl** veröffentlicht wurde und dann auch **Chromosomenanomalien** erkannt werden konnten.

T.S. PAINTER, AUS: T.C. HSU, HUMAN AND MAMMALIAN CYTOGENETICS, SPRINGER 1979

Camera-lucida-Zeichnung der Metaphase einer menschlichen Urkeimzelle (Spermatogonie) von Theophilus S. Painter. In dieser Phase der Kernteilung ordnen sich die Chromosomen in der Äquatorialebene der Zelle zur Metaphasenplatte an. Die Darstellung zeigt vermeintlich 48 Chromosomen. Painters zytologische Technik war zwar auf dem Stand seiner Zeit, dennoch ist eine exakte Zählung schwierig, wenn nicht unmöglich.

Seine ersten Angaben zu menschlichen Chromosomen veröffentlichte er 1921. In dieser Mitteilung berichtete er über das Vorhandensein eines Y-Chromosoms (neben einem X) in menschlichen Hodenzellen sowie über eine Höchstgesamtzahl von 48.[21] In den nächsten sieben Jahren untersuchte er weiterhin nur Säugerchromosomen, darunter von Opossums, Pferden und Affen. Erst 1929 wandte sich Painter wieder der Insektenzytologie zu und betrieb Zellgenetik an der Taufliege – vermutlich unter dem Einfluss des Genetikers Hermann J. Muller, der damals am selben Institut arbeitete und später den Nobelpreis erhielt[22]. Im Jahr 1933 entdeckte Painter, dass es sich bei den auffälligen Strukturen in den Zellkernen der Speicheldrüsen aller Zweiflügler (Diptera) um Riesenchromosomen handelte, die aus mehreren eng gepaarten homologen Chromosomen bestanden. Vor dem Hintergrund der bereits umfangreichen genetischen Daten zur Taufliege gelang es ihm, die Zytogenetik der Riesenchromosomen auf ein neues Niveau zu heben.[23] Diese Arbeiten trugen ihm eine Reihe von Ehrungen ein, und schon bald galt er als einer der führenden Zellgenetiker seiner Zeit.

Liest man Painters ursprüngliche Artikel zu menschlichen Chromosomen, fällt auf, dass er sich über deren Zahl anfänglich keineswegs im Klaren war. »In meinem Material bewegt sich die Zahl sichtbarer Chromosomen zwischen 45 und 48, während in den klarsten bisher untersuchten Äquatorialplatten nur 46 zu finden sind.«[21] Die tatsächliche Zahl, so seine Folgerung im ersten seiner Artikel 1921, musste geradzahlig und daher entweder 46 oder 48 sein. Zwei Jahre später, in seiner Hauptveröffentlichung zu den Chromosomenzahlen bei der Spermatogenese, äußerte er immer noch Zweifel, schloss jedoch, die korrekte Zahl sei 48.[24]

Als ich seine Abbildungen betrachtete – es handelt sich um Zeichnungen, die er anhand von Camera-lucida-Projektionen der mikroskopischen Bilder angefertigt hatte (siehe Illustration oben) –, verstand ich seine Schwierigkeiten, die korrekte Zahl zu ermitteln. Ähnlich äußerte sich 1979 Tao-Chiuh Hsu, ein prominenter Zytogenetiker, der die Methode des hypotonen Schocks zur Chromosomenspreitung mitentdeckt hat. Angesichts eines der Objektträger aus der Sammlung von Painter meinte er, es sei »erstaunlich, dass dieser dem wahren Wert auch nur nahekam.«[25]

Was veranlasste Painter dann, so positiv für 48 zu votieren? Seine Publikation von 1921 drehte sich hauptsächlich um die Frage, ob die Geschlechtsbestimmung beim Menschen über einen X0- oder über einen XY-Mechanismus läuft. In der späteren Arbeit aus dem Jahr 1923 stand dann die Anzahl der Chromosomen im Mittelpunkt. Möglicherweise hatte er befürchtet, seine Ergebnisse nicht publizieren zu können, wenn keine bestimmte Zahl zu ermitteln war. Bentley Glass erwähnte 1990 in seiner biografischen Denkschrift über Painter, dass der »schwer unter diesem Irrtum litt, gerade weil es sich um eine grundlegende Entdeckung handelte, für die er bekannt und vielfach zitiert wurde«.[26]

Der Yale-Genetiker Frank Ruddle äußerte 2004 die Vermutung, Painter habe vielleicht Chromosom 1 als zwei getrennte interpretiert – es trägt einen großen Abschnitt an schlechter anfärbbarem Heterochromatin in der Nähe des Zentromers, der Primäreinschnürung.[27] Ähnliches hatte zuvor auch die Genetikerin Maj Hultén vermutet.[28] Dies ist zwar eine mögliche Erklärung, dennoch denke ich, das Hauptproblem war die damals unzureichende Qualität der Präparate, die kein exaktes Abzählen der Chromosomen zuließ. Zum Beispiel wies mich der Genetiker James Crow von der University of Wisconsin in Madison auf einen wenig bekannten Umstand hin: Painter untersuchte auch Hodenmaterial von Patienten mit Down-Syndrom (also einem zusätzlichen Chromosom 21) – erhalten hatte er es von Charles B. Davenport, damals Leiter des Cold Spring Harbor Laboratory auf Long Island[29] –, konnte aber keine Chromosomenanomalien feststellen. Dies bedeutet im Grunde, dass weder Painter noch vermutlich irgendein anderer Säugetierzytologe seiner Zeit fähig war, ein überzähliges kleines Chromosom sicher nachzuweisen.

Wegbereitender technischer Wandel

Während Painter und seine Zeitgenossen die Anzahl menschlicher Chromosomen falsch bestimmten, gelangten sie bei anderen Spezies zum korrekten Ergebnis – obwohl sie ähnliche Materialien und Techniken verwendeten. Einer der Gründe für diese Diskrepanz war meines Erachtens die beschränkte Verfügbarkeit frischer menschlicher Gewebeproben: Ursamenzellen gehören zu den wenigen Zelltypen des Menschen mit hoher Teilungsrate, entsprechendes Probenmaterial war aber in den 1920er und 1930er Jahren nur schwer zu bekommen. Der Biologiehistoriker Malcolm Kottler berichtete 1974 in seiner hervorragenden Übersichtsarbeit zur Geschichte der Chromosomenzählung, dass die Zytologen »buchstäblich am Fuß des Galgens warteten, um das Hodengewebe des Gehängten zu fixieren, bevor die Chromosomen verklumpten«.[30]

Von Versuchstieren hingegen war entsprechendes Material quasi unbegrenzt verfügbar. Anders als bei menschlichem Gewebe bot sich hier der Luxus, nach der einen perfekten Zelle

suchen zu können; mit den damals üblichen Methoden ließen sich die Chromosomen nur bei einem sehr geringen Anteil der teilungsaktiven Zellen exakt auszählen.

Ein wesentliches technisches Hindernis stellte die Paraffinschnittmethode dar, die Painter und andere Zytologen nutzten. Dabei wird ein fixiertes, also konserviertes Gewebestück in Paraffin getränkt und der ausgehärtete Paraffinblock dann in hauchdünne Scheibchen geschnitten. Nachdem die einzelnen Schnitte der Serie auf Objektträger montiert sind, wird das Paraffin herausgelöst und das Gewebe zum mikroskopischen Begutachten angefärbt. Diese Technik erlaubt es nicht, Chromosomen voneinander zu separieren, zudem werden beim Schneiden des Blocks Zellen und damit auch manche Chromosomen durchtrennt, was die Beurteilung weiter erschwert.

Wie es der Zufall will, beschrieb der englische Zytogenetiker John Belling im selben Jahr, in dem Painters erste Arbeit über menschliche Chromosomen erschien, seine Quetschtechnik zur Chromosomenzählung in Pollenmutterzellen von Pflanzen.[31] Er drückte die Zellen zwischen Objektträger und Deckglas flach, quetschte sie also, was die Chromosomen gewöhnlich seitlich ausweichen ließ und sie über eine größere Fläche verteilte. Quetschpräparate wurden bald zum Standard in der Zytologie, und Painter verwendete diese Technik dann für seine Untersuchungen der Riesenchromosomen in den Speicheldrüsen der Taufliege. Allerdings hätten Quetschpräparate allein die Schwierigkeiten beim Bestimmen der menschlichen Chromosomenzahl vermutlich nicht gelöst, zumindest nicht bei Proben aus Hodengewebe. Tatsächlich untersuchte Ursula Mittwoch 1952 am Galton Laboratory in London auf diese Weise Hodengewebe von einem Patienten mit Down-Syndrom – und kam dennoch sowohl in Ursamenzellen als auch in Spermatozyten (Spermienmutterzellen) auf 48 Chromosomen.[32]

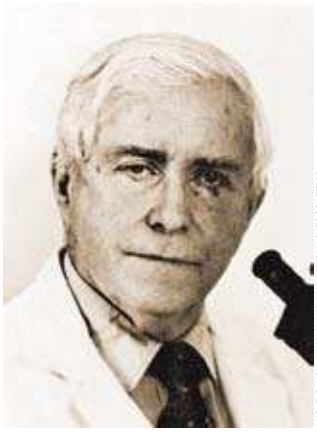
Die möglicherweise wichtigste technische Verbesserung für Chromosomenstudien brachte der Einsatz hypotoner, nicht isotonischer Lösungen; er führt zur Ausbreitung des Zellkerninhalts auf dem Objektträger. Bereits in den 1930er Jahren von Eleanor Slifer an der Iowa University für die Insektenzytologie verwendet [33], aber zunächst übersehen, wurde die Methode später unabhängig von drei Arbeitsgruppen für den Bereich Säugetiere erneut entdeckt.[34–36] Sofern das untersuchte Gewebe eine ausreichende Zahl teilungsaktiver Zellen aufweist, kann ein hypotoner Schock allein schon ausreichen, um gut beurteilbare Chromosomenpräparate herzustellen. So gelang es Charles Ford und John Hamerton an der Radiobiological Unit in Harwell (England) damit, die von Tjio und Levan[14] ermittelte Zahl von 46 menschlichen Chromosomen an Hodengewebe rasch zu bestätigen.[37]

Eine weitere wichtige technische Erweiterung des humanzytologischen Arsenals stellte der Einsatz von Colchicin dar: Das Mitosegift hält die Kernteilung in der Metaphase an und erhöht so die Anzahl Zellen in diesem Stadium, wo sich Chromosomen auszählen lassen. Einer der Entdecker dieses Effekts war Levan[38] aus dem berühmten Duo Tjio und Levan. Anders als bei Pflanzen blieb Colchicin anfänglich von begrenztem Wert für die Zytologie menschlicher und tierischer Gewebe, bis es in Kombination mit der Zellkultivierung angewandt wurde. Es verbessert zugleich die Kondensation des Chromatins zu kompakten Gebilden und minimiert so die Gefahr, dass sich Chromosomen im Präparat überlappen. Die Kombination aus hypotonem Schock (Ausbreitung der Chromosomen) und Colchicin (stärker kondensierte Metaphase-Chromosomen) ermöglichte Tjio und Levan ihre Bilderbuch-Präparate.

Interesse an Krebs

In den 1950er Jahren waren alle technischen Voraussetzungen zur Herstellung hochwertiger Metaphasepräparate menschlicher Zellen gegeben. Doch noch immer erschienen Veröffentlichungen, die Painters Zählung stützten. Das erstaunlichste Beispiel ist ein Artikel von Levan, der im selben Jahr erschien wie die bahnbrechende Arbeit von Tjio und ihm selbst (aber am 1. Dezember 1955 eingegangen war).

Der schwedische Zytologe (Foto rechts) hatte bei einem Forschungsaufenthalt am Sloan Kettering Institute in New York Chromosomen menschlicher Krebszelllinien untersucht und daran gearbeitet, seine Methodik der Chromosomenpräparation mittels Colchicin und hypotonem Schock zu perfektionieren. Seine Experimente zeigten, dass mehrere Krebszelllinien, aber auch einige Kontrollzellen mancher Langzeitkulturen eine heteroploide Chromosomenausstattung aufwiesen (somit eine Chromosomenzahl, die kein ganzzahliges Vielfaches des einfachen, haploiden Chromosomensatzes ist).[39] Zu einer Kultur von Fibroblasten, Bildungszellen für Bindegewebe, hingegen bemerkte Levan: Sie »erbrachte die erwartete normale Chromosomenzahl«.[39] Noch in den Monaten bevor er zusammen mit Tjio den heute klassischen Artikel mit dem Nachweis veröffentlichte, dass die korrekte Chromosomenzahl des Menschen 46 ist, stand er also noch ganz unter dem übermächtigen Einfluss von Painter und dessen Zahl 48.



AUS: T. C. HSU, HUMAN AND MAMMALIAN CYTOGENETICS: AN HISTORICAL PERSPECTIVE, SPRINGER 1979

Albert Levan (1905 – 1998), Mitentdecker der korrekten Chromosomenzahl, leitete damals das Krebschromosomenlabor am Institut für Genetik der Universität Lund in Schweden.

Über einen weiteren viel sagenden Vorfall zur damaligen Voreingenommenheit berichtete 2002 Hultén, die als Studentin in derselben Abteilung wie Tjio und Levan gearbeitet hatte, als diese ihre entscheidende Untersuchung durchführten. Sie erinnert sich, der Direktor des Instituts, Arne Müntzing, habe ihr gegenüber erwähnt, dass »Anfang jenes Jahres die Doctores Eva und Yngve Melander Schwierigkeiten bei der Präparation von Chromosomen normaler fötaler Zellen des Menschen hatten; sie konnten nur unvollständige Platten mit maximal 46 Chromosomen finden«.[28]

Einem 2006 veröffentlichten Bericht von Peter Harper zufolge zeigten die Melanders ihre Ergebnisse sogar Levan, bevor er 1955 zu seinem Forschungsaufenthalt am Sloan Kettering Institute abreiste. Offenbar kam es ihm nicht in den Sinn, die korrekte Chromosomenzahl könnte nicht 48 sein. So überwältigend wirkte der bisherige Beleg, dass niemand Painters Ergebnisse anzuzweifeln schien. Levan war damals bereits ein angesehener Hochschullehrer im schwedischen Lund; er hatte mit seinen Arbeiten zum Einsatz von Colchicin bei Pflanzenzellen schon einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Zytogenetik geleistet. Mittlerweile hatte er sein Labor weit gehend auf die Arbeit mit tierischen Krebszelllinien umgestellt und war daran interessiert, die Chromosomenanalyse zu optimieren, um potenziell bedeutsame zytologische Veränderungen bei der Krebsentstehung entdecken zu können.

AUS: T.C. HSU, HUMAN AND MAMMALIAN CYTOGENETICS: AN HISTORICAL PERSPECTIVE, SPRINGER 1979

Joe Hin Tjio (1919 – 2001) ermittelte zusammen mit Levan in Lund die korrekte Chromosomenzahl von 46.

Eine ungewöhnliche Biografie

Der andere des Duos, Tjio (Foto links), wurde als Sohn chinesischer Eltern 1919 auf Java geboren, das damals zu Niederländisch-Ostindien gehörte. Er lernte das Fotografenhandwerk vom Vater, erwarb in Kolonialschulen vielfältige Sprachkenntnisse und studierte am College Agronomie. Zu Beginn des Zweiten Weltkriegs arbeitete er auf Java als Agrowissenschaftler an der Züchtung neuer Kartoffelsorten und beschäftigte sich mit Pflanzenzytogenetik. Nach der japanischen Besetzung Javas 1942 wurde Tjio gefangen genommen und gefoltert, um eventuelle militärisch verwertbare Informationen zu erpressen. Er blieb bis zum Kriegsende drei Jahre in Haft. Danach gelangte er, da er als Vertriebener galt, in die Niederlande, wo er von der Regierung ein Stipendium für ein Studium in Europa erhielt. Einige Zeit verbrachte er an der Königlich Dänischen Akademie in Kopenhagen und baute zudem seine Kooperation mit Levan an der Universität von Lund auf.

Im Jahr 1948 erhielt Tjio eine Stellung im spanischen Saragossa, wo er zytogenetische Forschungen an Pflanzen leitete, jedoch im Sommer regelmäßig Auszeiten nahm, um seine Zusammenarbeit mit Levan weiterzuführen. In Lund konzentrierte er sich dann auf die Erforschung der Chromosomen von Krebszellen, und zwar auf die Frage, ob das Tumorwachstum mit konsistenten chromosomalen Veränderungen einherging. Als hinderlich für seine Arbeit erwies sich der Mangel an guten Daten zu den normalen menschlichen Chromosomen. Das Viruslabor in Lund hatte Zugang zu fötalen Geweben, und im Spätjahr 1955 bekam Tjio die Nachricht, es seien mehrere fötale Zellkulturen verfügbar, an denen er normale humane Chromosomen untersuchen könne. Also reiste er im Dezember desselben Jahres wieder nach Lund und konnte binnen kurzer Zeit die Ergebnisse gewinnen, auf denen der 1956 veröffentlichte klassische Artikel fußt.

Zwist um die Autorenschaft

Tjio war durch seine ungewöhnliche Biografie möglicherweise eher als andere geneigt, Autoritätsansprüche hinsichtlich der »48« in Frage zu stellen. Auch musste er die Daten des Ehepaars Melander gekannt haben: In ihrer Publikation von 1956 nennen Tjio und Levan die Melanders und Stig Kullander, einen weiteren Mitarbeiter der Gruppe, als Forscher, die zuvor in kultivierten menschlichen Zellen 46 Chromosomen gezählt hatten.

Als Tjio 1978 in einem Beitrag den Hergang der Entdeckung schilderte, schrieb er, dass sich die frühen Schnitte aus entnommenem Hodengewebe schwer interpretieren ließen. Wegen dürftiger Qualität sei Anfang der 1950er Jahre auch die Untersuchung von Ausstrichpräparaten problematisch gewesen, und die Interpretation der Chromosomenkonfigurationen habe viel Wunschdenken beinhaltet.[41] Ich bin jedoch überzeugt, der wichtigste Faktor für das Anzweifeln der »48« war die Qualität von Tjios Präparaten. Es handelte sich einfach um die besten jemals hergestellten Metaphasepräparate menschlicher Zellen. Da gab es an der Chromosomenzahl nichts mehr zu deuteln!

Die Arbeit von Tjio und Levan erschien als erster Beitrag im 1956er Band der Fachzeitschrift »Hereditas« (siehe Abbildung rechts oben). Ihre Ergebnisse präsentierten die beiden auch als Posterdemonstration beim Ersten Internationalen Kongress für Humangenetik in Kopenhagen 1956. Muller, der Nobelpreisträger, nahm an diesem Kongress teil und war so beeindruckt, dass er Tjio ermunterte, nach Amerika zu gehen und bei Theodore T. Puck an der University of Colorado in Denver zu arbeiten, einem Pionier auf dem neuen Forschungsfeld der Humanzytogenetik

mit Nichtgeschlechtszellen. Tjio lehnte zunächst ab, da ihn die für Wirbel sorgenden Schauverhöre der McCarthy-Ära abstießen. Daraufhin schickte ihm Muller offenbar Ausschnitte aus der »New York Times« mit kritischen Stimmen zu McCarthy. Tjio änderte seine Haltung und begann schon 1957 an Pucks Labor zu arbeiten. Nachdem er zusammen mit diesem einen Artikel veröffentlicht hatte, der die neue Chromosomenzahl bestätigte[42], erhielt Tjio die überaus verdiente Doktorwürde. Im Jahr 1959 luden ihn die National Health Institutes in Bethesda (Maryland) als Gastwissenschaftler ein, wo er für den Rest seiner Laufbahn blieb.

Einer der unschönen Aspekte dieser Geschichte ist, dass Tjio und Levan anscheinend über die Autorenschaft ihres gemeinsamen Artikels in Zwist gerieten. Wer von beiden sollte der Erstautor sein? Einer kurzen Darstellung von Rich McManus zufolge, die auf einem Interview mit Tjio Ende der 1990er Jahre basiert, hatte Levan die erste Position mit der Begründung beansprucht, er sei der Leiter des Labors.[43] Dies erscheint jedoch unwahrscheinlich, da die beiden zuvor schon mindestens fünf andere Artikel publiziert hatten – immer mit Tjio als Erstautor.

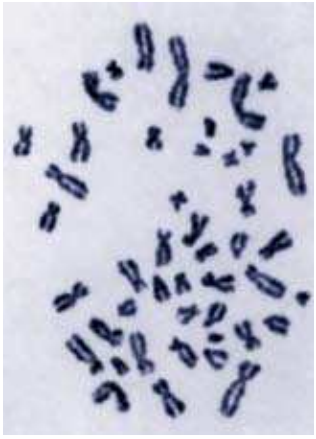
Der Disput entzündete sich vermutlich eher an der Frage, wer die eigentlich treibende Kraft hinter den Experimenten war. Zweifellos hatte Tjio die Laborarbeiten durchgeführt und die ersten Zählungen vorgenommen. Da Levan zudem bei seinen Experimenten am Sloan Kettering Institute 1955 die korrekte Chromosomenzahl verfehlt hatte[39], ist die Nennung von Tjio als Erstautor wohl angemessen. Heute, in einer Zeit langer Autorenlisten, mutet eine solche Auseinandersetzung merkwürdig an, insbesondere da nur zwei Autoren beteiligt waren und beide genügend Ruhm ernteten.

46 statt 48: wie wichtig?

Ich erfuhr von Tjios und Levans Arbeit 1956 auf dem Ersten Internationalen Kongress für Humangenetik in Kopenhagen. Beide hielten keinen Vortrag, präsentierten jedoch ein Poster, das viel Aufmerksamkeit erregte. Ich war damals Postdoc und erinnere mich gut, dass mindestens einer der älteren Wissenschaftler sagte: »Sehr interessant, aber macht das einen Unterschied?« Formalgenetische Analysen und ein Großteil der molekularbiologischen Forschung sind von der Kenntnis der Chromosomenzahl unabhängig. So entwickelte sich etwa das Gebiet der Hefegenetik in den 1960er und 1970er Jahren sprunghaft, obwohl die Chromosomenzahl von Hefe erst 1985 korrekt bestimmt wurde.[44] Die Unkenntnis behinderte das Vorankommen hier offensichtlich überhaupt nicht. Die Humangenetik jedoch befand sich, wie eingangs erwähnt, 1956 noch auf einem anderen Stand, und der Beitrag von Tjio und Levan sollte dann wichtige Auswirkungen haben.

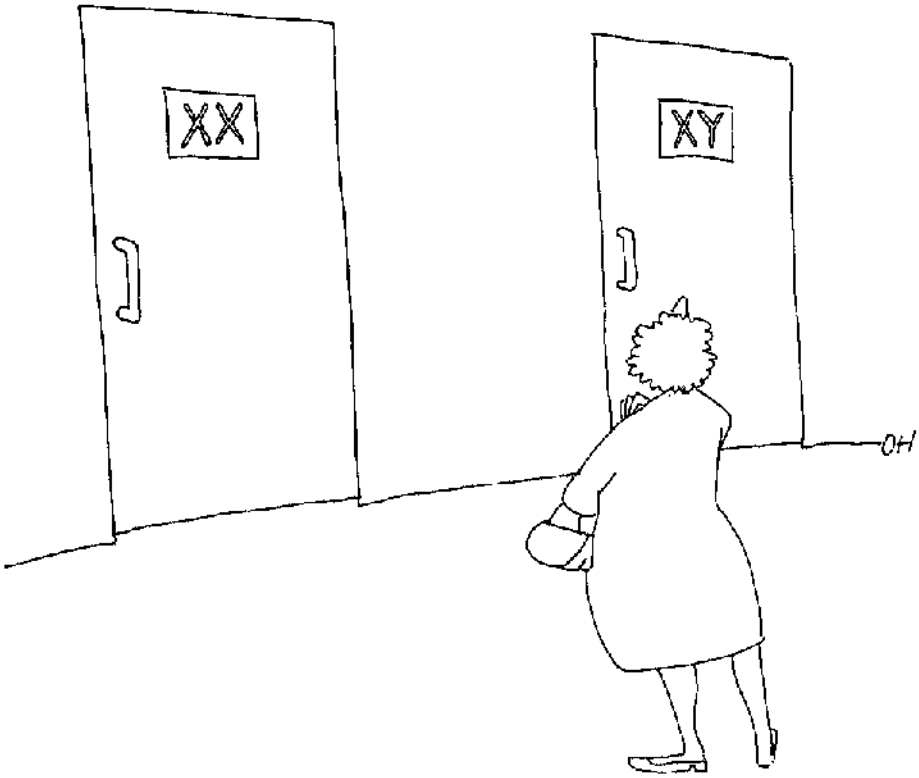
Überraschenderweise geschah dies jedoch nicht sofort. Erst 1959 erschienen Berichte über Abweichungen in der Anzahl einzelner Chromosomen bei Down-,Turner- (nur ein X) und Klinefelter-Syndrom (XXY).[47,45,46] Beschreibungen von XXX-Frauen[48] und XYY-Männern[49] folgten bald – das Forschungsgebiet der medizinischen Zytogenetik war geboren. Mit der Entwicklung der Fruchtwasseranalyse (Amniozentese) in den 1960er Jahren fanden diese Erkenntnisse auch eine wichtige praktische Anwendung. Noch 1956 konnte man niemanden als medizinischen Zytogenetiker bezeichnen. Heute gibt es weltweit vermutlich wenigstens tausend hauptberufliche Experten hierfür und zehnmal so viele im Nebenamt. Zumindest ließ der Artikel von Tjio und Levan einen kleineren Wirtschaftszweig entstehen. Sie selbst beteiligten sich an dieser zytogenetischen Arbeit nicht, wohl weil sie sich wieder ihren Chromosomenuntersuchungen bei Krebszellen widmeten.

Im Jahr 1960 entdeckte Peter Nowell an der University of Pennsylvania in Philadelphia, dass Phytohämagglutinin, ein pflanzliches Polysaccharid, weiße Blutkörperchen in einem Nährmedium zur Teilung anregt.[50] Die Anwendung dieser Erkenntnis verlieh der Humanzytogenetik einen enormen Schub. Noch im selben Jahr entdeckten er und David Hun-



AUS: J. H. TJIO UND A. LEVAN, THE CHROMOSOME NUMBER OF MAN, HEREDITAS 1956, VOL. 42, S. 1-6, BLACKWELL PUBLISHING

Die Metaphaseplatte einer menschlichen Zelle aus dem Originalartikel von Tjio und Levan zeigt eindeutig nur 46 Chromsomen.



gerford das Philadelphia-Chromosom: Bei Patienten mit chronisch-myeloischer Leukämie schien dem Chromosom 22 ein Stück zu fehlen.[51] Dies war die erste krebsspezifische Chromosomenaberration beim Menschen. Tjio widmete dann einen Gutteil seiner Laufbahn der Erforschung des Philadelphia-Chromosoms.

Ende der 1960er Jahre leistete Torbjörn Casperssons Arbeitsgruppe in Stockholm als zweites schwedisches Forscherteam einen wichtigen Beitrag zum Fortschritt der Humanzytogenetik, als sie die Technik der Chromosomenbänderung einführte.[52] Diese zytologische Methode ermöglichte es, anhand des typischen Bandenmusters die einzelnen Chromosomen zuverlässig zu unterscheiden, das Crossing-over zwischen Chromosomen während der Reifeteilung (Meiose)[53] zu analysieren und vor allem Umstrukturierungen bei Chromosomen genau zu untersuchen. An der University of Chicago gelang Janet Rowley Anfang der 1970er Jahre mit Hilfe des Bandenmusters der Nachweis, dass das Philadelphia-Chromosom in Wirklichkeit durch eine Translokation zwischen Chromosom 9 und 22 entsteht (bei der Letzteres einen kürzeren Abschnitt zurückerhält, als es abgibt) und nicht durch einen einfachen Stückverlust bei Chromosoms 22.[54] Diese Erkenntnis wirkte sich tief greifend auf das Verständnis der Entstehung und Zytogenetik von Krebs aus.

Wie eingangs ebenfalls erwähnt war 1956 noch kein einziges menschliches Gen einem bestimmten der autosomalen, also Nichtgeschlechtschromosomen zugeordnet. Dies hatte sich selbst zehn Jahre später noch nicht geändert, obwohl bis dahin durch Stammbaumanalysen die Existenz von etwa 600 autosomal und 70 X-chromosomal vererbten Genen belegt war. Mitte der 1960er Jahre gelang es der Arbeitsgruppe um Henry Harris,[55] damals an der University of Oxford, sowie Boris Ephrussi und Mary Weiss[56], damals an der Western Reserve University in Cleveland (Ohio), Hybride aus Körperzellen von Mäusen und Menschen zu erzeugen, die bei weiteren Zellteilungen bevorzugt menschliche Chromosomen verloren. Dieser selektive Verlust eröffnete die Möglichkeit, menschliche Gene zu kartieren: durch Korrelation von Genexpressionsmustern mit der jeweiligen Chromosomenausstattung. Mit Hilfe dieser Technik konnte zwei Jahre danach, 1967, das erste Gen einem Autosom zugeordnet werden.[57] Später, als die Isolierung einzelner Gene möglich wurde, konnten markierte Gensonden direkt zu Chromosomenpräparaten gegeben und der Ort ihrer Anlagerung analysiert werden.

Die Arbeiten von Tjio und Levan trugen daher nicht nur unmittelbar zu Fortschritten der humanen Zytogenetik bei, sondern stellten auch einen wichtigen Baustein in der frühen Entwicklung der formalen Humangenetik dar.

Wie wäre die Geschichte der Humangenetik ohne Tjio und Levan verlaufen? Es gibt keine Anzeichen, dass andere Forscher damals eine Überprüfung der etablierten Vorstellung von 48 menschlichen Chromosomen planten. Möglicherweise hätte es daher noch einige Jahre gedauert, bis die Humanzytogenetik in Schwung und eine so wichtige Entdeckungen wie das Philadelphia-Chromosom zu Stande gekommen wäre. Mit längerem zeitlichem Abstand hätte sich die formale Humangenetik jedoch auch eigenständig weiterentwickelt, vermutlich mittels DNA-Polymorphismen und Stammbaumanalysen. Womöglich hätte im Rahmen des Humangenomprojekts dann die korrekte Anzahl menschlicher Chromosomen auf rein molekulare Weise bestimmt werden können.

Worüber man noch spekulieren darf

Es ist andererseits auch interessant zu spekulieren, wie die Geschichte der Humangenetik verlaufen wäre, hätte Painter 1923 gefolgert, die korrekte Zahl sei 46. Tjio und Levan hätten ihre Arbeiten wohl dennoch durchgeführt und gezeigt, dass sich eindeutig interpretierbare, hochästhetische Chromosomenpräparate menschlicher Zellen herstellen lassen. Ihre Arbeit hätte zwar sicher weniger Aufmerksamkeit erregt (und Painters Reputation weniger gelitten), wäre aber vermutlich von genügend Wissenschaftlern bemerkt und, wenn vielleicht auch nicht so schnell, zum ersten Nachweis menschlicher Aneuploidien genutzt worden.

Die meisten Autoren, die sich mit dieser interessanten Periode in der Entwicklung der Humangenetik beschäftigen, führen die Persistenz der falschen Chromosomenzahl nach Painters Publikation auf »Voreingenommenheit« zurück.[30] Die richtige Zahl musste 48 sein, daher gaben sich die nachfolgenden Wissenschaftler alle Mühe, 48 Chromosomen zu zählen. Die eigentliche Überraschung ist jedoch, dass die Qualität von Painters Zeichnungen nie in der Kritik stand. Es wäre hochinteressant zu erfahren, ob sich einer der Referenten, die Painters Publikationen über die menschlichen Chromosomen begutachteten, zur Qualität von dessen Präparaten geäußert hat. Voreingenommenheit war sicher ein Faktor, der die Richtigstellung der Chromosomenzahl verzögerte. Mindestens ebenso wichtig dürfte jedoch meiner Ansicht nach die Tatsache gewesen sein, dass die Qualität der Originaldaten überraschenderweise nie kritisiert wurde. ◁

Stanley M. Gartler arbeitet an den Abteilungen für Medizin und Genomwissenschaften der University of Washington in Seattle, Washington 98185, USA.
E-Mail: gartler@u.washington.edu

@ Nature Publishing Group
www.nature.com/nature

doi10.1038/nrg1917

Die Indexzahlen im Text verweisen auf die Referenzen der Original-Literaturliste. Sie finden Sie mit weiteren Informationen und Links unter www.spektrum.de/artikel/951086.

Arnason, U.: 50 Years after – Examination of some Circumstances around the Establishment of the Correct Chromosome Number of Man. In: Hereditas 143, S. 202 – 211, 2006.

»Wir stehen erst ganz am Anfang«

Gegner einer Novellierung des Stammzellgesetzes (siehe Essay S. 84) spielten adulte gegen embryonale Stammzellen aus. Sind sie wirklich ein gleichwertiger Ersatz? Anthony Ho vom Universitätsklinikum Heidelberg, der als Spezialist für die Therapie von Blutkrebserkrankungen mit adulten Stammzellen aus dem Knochenmark arbeitet, äußert sich zum Stand der Forschung und wägt die Alternativen ab.

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HEIDELBERG

Spektrum: Die Debatte um das Stammzellgesetz spiegelte auch die Skepsis gegenüber dem konkreten medizinischen Nutzen der Forschung an embryonalen Stammzellen wider. Hat die Wissenschaft die Erwartungen zu hoch geschraubt?

Professor Dr. Anthony Ho: Einige wenige Wissenschaftler müssen sich tatsächlich vorwerfen lassen, mit vorschnellen Heilsversprechungen verfrühte und letztlich falsche Hoffnungen für Therapien geweckt zu haben. Die Forschung an embryonalen Stammzellen ist eben noch immer reine Grundlagenforschung. Aber nehmen Sie den Vergleich zu den adulten: Blutstammzellen wurden im Tiermodell erstmals im Jahr 1961 nachgewiesen. Von der Entdeckung bis zur breiten klinischen Anwendung hat es über 20 Jahre gedauert. Es ist also vollkommen normal, dass die Entwicklung von Therapien lange Zeiträume in Anspruch nimmt.

Kritiker einer Stichtagsverschiebung behaupten nun aber, adulte Stammzellen hätten ihr Potenzial bereits mehrfach bewiesen – die Forschung hier sei somit aussichtsreicher. Wie viele Krankheiten lassen sich denn heute schon tatsächlich damit heilen?

Da stehen viele Zahlen im Raum, die meisten sind aber noch sehr umstritten. Entscheidend ist, welche Therapien bereits heute routinemäßig eingesetzt werden. Und da gibt es nur zwei Bereiche, in denen Patienten schon von der Stammzelltechnologie profitieren. Erstens lassen sich mit den Blut bildenden Stammzellen aus dem Knochenmark gewisse Krebsarten wie Leukämie, Lymphdrüsenkrebs und einige andere, ganz seltene Krebsformen heilen. An zweiter Stelle steht die Behandlung ausgedehnter Hautverbrennungen. Diese Therapie gibt es seit Mitte der 1980er Jahre. Dazu entnimmt man einer gesunden Hautpartie eine Gewebeprobe und züchtet daraus Transplantate. Damit kann man dann die verwundeten Flächen bedecken. Das ist ein sehr langer Prozess, der sich über mehrere Monate hinziehen kann. Nur in diesen beiden Bereichen existieren Therapien, deren Wirksamkeit bereits heute anerkannt ist. Alles andere befindet sich noch im Versuchsstadium.

Inwiefern kann die Erforschung embryonaler Stammzellen hier neue Impulse liefern?

Diese Stammzellen sind besonders vermehrungsfähig und vielseitig: Sie können sich in jede Zelle unseres Körpers verwandeln. Die Steuerung dieser Ausdifferenzierung ist ein faszinierender Prozess. Verstehen wir die zu Grunde liegenden Mechanismen, die embryonale Stammzellen von Alleskönnern zu Spezialisten machen, dann können wir auch adulte Stammzellen gezielter stimulieren und womöglich durch Manipulation bestimmter Faktoren in die richtige Bahn lenken.

Müssen es zur Erforschung der Mechanismen denn unbedingt embryonale Stammzellen sein?

Möglicherweise nicht, die Entwicklung geht schon weiter: Mittlerweile lassen sich auch aus einfachen Hautzellen Erwachsener so genannte induzierte Stammzellen gewinnen, die ebenfalls pluripotent sind. Das ist eine aufregende Entwicklung. Diese Babyzellen, wie ich sie nenne, weil ihre Lebensuhr zurückgedreht wurde, stehen embryonalen Stammzellen in ihren Fähigkeiten erstaunlicherweise kaum nach. Das ist ein großartiger Erfolg, der aber nur durch die vergleichende Forschung zwischen adulten und embryonalen Stammzellen möglich wurde.

Kam die Entdeckung für Sie denn überraschend?

Eigentlich nicht. In zehn Jahren Fleißarbeit hat man aus tausenden Unterschieden in den Genexpressionen genau die vier Gene herausgefiltert, die man einschleusen muss, um eine Körperzelle in eine solche induzierte Stammzelle zurückzuverwandeln. Da sich diese Babyzellen individuell gewinnen lassen, sind sie theoretisch sogar transplantationsfähig. Die Gefahr der Abstoßung ist gering. Nun müssen wir allerdings die nächste Hürde nehmen und lernen, die enorme Vermehrungsfähigkeit induzierter Stammzellen gezielt zu steuern, um auch die Krebsgefahr in den Griff zu bekommen. Da stehen wir aber erst ganz am Anfang.

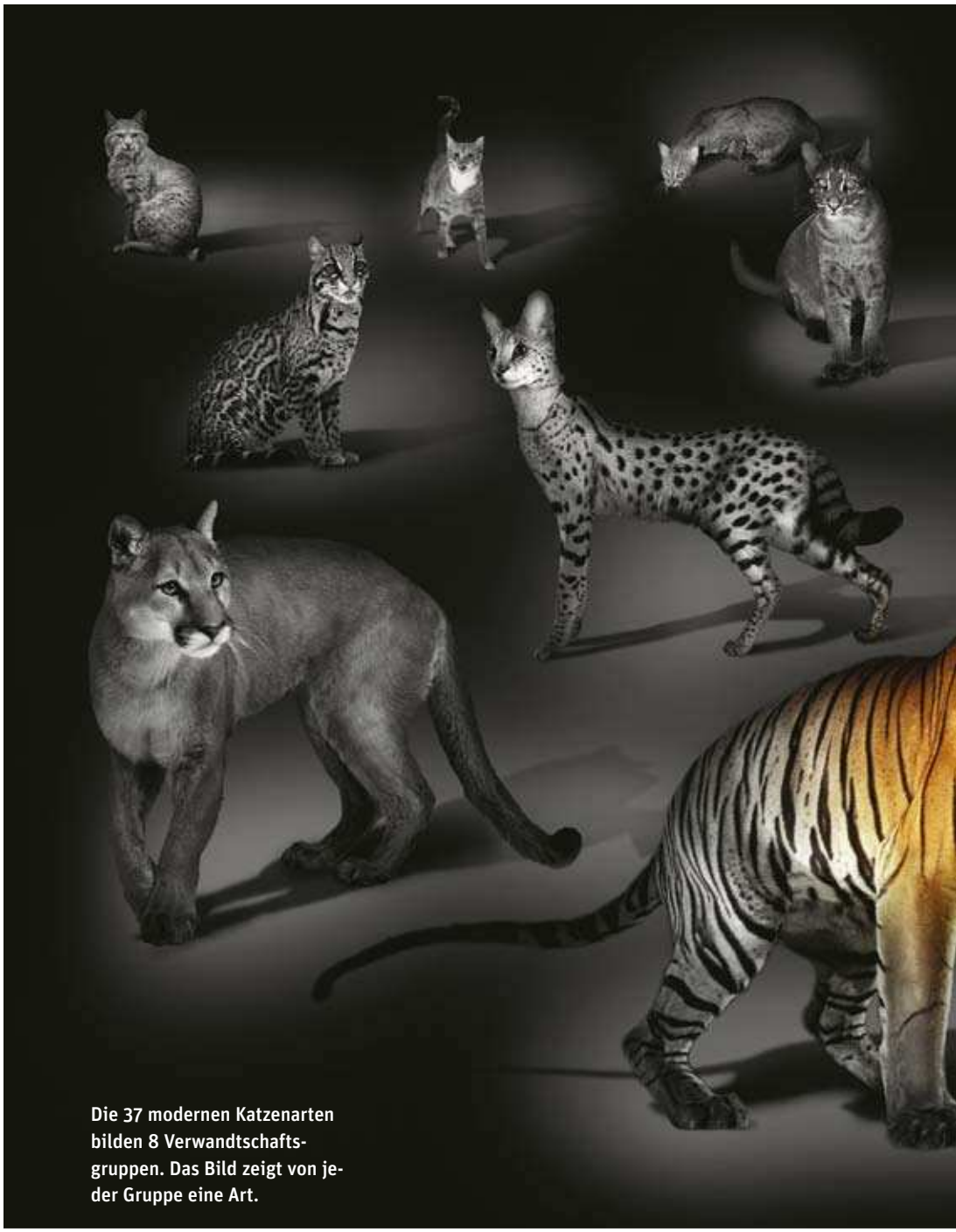
Ist das therapeutische Klonen vor dem Hintergrund dieser Entwicklung also nur noch ein Auslaufmodell?

Grundsätzlich schließt das eine das andere nicht aus. Erste Untersuchungen deuten allerdings an, dass die induzierten Stammzellen tatsächlich so gut sind, dass man eines Tages womöglich nicht mehr auf therapeutisches Klonen angewiesen sein wird. Vorerst brauchen wir aber weiter den Vergleich. ◁

Die Fragen stellte ***Christoph Marty.***
Er studiert Wissenschaftsjournalismus in Dortmund.

DER NEUE STAMMBAUM DER KATZEN

Wie die Evolution der Katzen ablief, offenbart nun ihr Erbgut. Durch akribische Genanalysen sind die Verwandtschaftsverhältnisse vom Löwen bis hin zum »Stubentiger« endlich klar geworden.



Die 37 modernen Katzenarten bilden 8 Verwandtschaftsgruppen. Das Bild zeigt von jeder Gruppe eine Art.

VON OBEN NACH UNTEN UND LINKS NACH RECHTS: 1. ROTLUCHS: CORBIS / DLILLC; 2. HAUSKATZE: CORBIS / IMAGE100 / RUSSELL GLENISTER; 3. ROSTKATZE: CORBIS / FLPA / TERRY WHITTAKER; 4. ASIATISCHE GOLDKATZE: ZAINAL ZAMARI ZAINUDDIN; 5. OZELOT: GETTY IMAGES / DAVE KING; 6. SERVAL: GETTY IMAGES / JOEL SARTORE; 7. PUMA: CORBIS / DANIEL J. COX; 8. TIGER: GETTY IMAGES / DARRYL ESTRINE; BEARBEITUNG: JAKES PORTO

Von Stephen J. O'Brien
und Warren E. Johnson

Der Minitiger, den Menschen so gern als Haustier halten, liebt es, uns mit seinem heimlichen Wesen in aller Anmut an der Nase herumzuführen. Aber auch die größeren Versionen der Katzen gaben sich bisher schwer durchschaubar – zumindest für Forscher, die wissen wollten, woher diese Raubtierfamilie stammt und wie – auch wo – sich ihre Evolution im Einzelnen abspielte. Bis vor Kurzem stand nicht einmal fest, wie viele Arten von Katzen (wissenschaftlich Feliden) heute existieren. Auch waren deren Verwandtschaftsbeziehungen oft keineswegs klar.

Zumindest über die Artenzahl herrscht inzwischen weit gehend Einigkeit: Demnach gliedert sich die Familie der Feliden in 37 Spezies, rechnet man die Hauskatze als eigene Art. Diese Arten in einen Stammbaum zu sortieren macht allerdings Schwierigkeiten, wie an den dutzenden Vorschlägen hierzu erkennbar. Manche Forscher möchten sämtliche Katzenarten auf nur zwei Gattungen – Genera – aufteilen. Dann gäbe es nur zwei Gruppen aus jeweils eng zusammengehörenden Arten. Andere plädieren für bis zu 23 Gattungen, was bedeuten würde, dass die Verwandtschaften der Katzenarten untereinander lockerer sind. Den Experten kann man die Konfusion aber kaum verdenken. Abgesehen von einer groben Einteilung in große, mittelgroße und kleine Katzen ähneln sich Vertreter der gleichen Größenklasse im Körperbau teils so stark, dass es mitunter selbst dem Fachmann schwerfällt, etwa einen Löwen- und einen Tigerschädel auseinanderzuhalten. Auch mit den genetischen Studien, die wir selbst in den vergangenen beiden Jahrzehnten vornahmen, kamen wir bislang nicht wirklich weiter.

Diese Situation hat sich allerdings in den letzten Jahren völlig geändert. Das verdanken wir revolutionären Ansätzen, das Erbgut verschiedenster Organismen vollständig zu sequenzieren. Mit dieser Forschung, allen voran durch das Humangenomprojekt, kamen höchst wertvolle neue Untersuchungsverfahren auf, die sich auch bestens für Evolutionsstudien eignen.

Mit der Unterstützung von Kollegen an anderen Forschungseinrichtungen konnten wir mit solchen Methoden nun erstmals aufzeigen, wie der Stammbaum der Feliden wirklich aussieht. Wir haben 30 Gene ausgewählt und daraus die gleichen Abschnitte bei allen lebenden Katzenarten verglichen (siehe Kasten S. 60). So machten wir zunächst die Äste und Verzweigungen des Baums dingfest. Dann bestimmten wir die Zeitpunkte der einzelnen Aufspaltungen mit Hilfe des Prinzips der so genannten molekularen Uhr. Zum einen nutzten wir zuverlässig datierte Fossilien, um ein paar feste zeitliche Anhaltspunkte zu gewinnen. Zum anderen bestimmten wir für die heutigen Katzenarten das Ausmaß von Unterschieden in ausgewählten Genen. Mutationen in den Genbausteinen ereignen sich in längeren Zeiträumen mit einer gewissen Regelmäßigkeit – weswegen ihr Ausmaß bei den einzelnen Arten Auskunft darüber gibt, wie lange die Evolutionslinien schon voneinander getrennt sind. Dank dieser Analysen kennen wir jetzt die Verwandtschaftsverhältnisse der modernen Katzen, sogar die zwischen den großen und kleinen Arten. Außerdem gewannen wir Einblick in die spannende, wechselhafte Verbreitungsgeschichte der Feliden. Ihren Anfang nahm sie in deren Urheimat Asien. Mit der Zeit eroberten die geschmeidigen Raubtiere fünf Kontinente, nur Australien und die Antarktis nicht.

Alle, die brüllen können

Wir erkannten gleich, dass uns die DNA-Untersuchungen offensichtlich acht getrennte Datencluster lieferten. Demnach würden sich die heutigen Katzenarten auf acht Hauptabstammungslinien verteilen (siehe Kasten S. 56/57). Zu unserer Begeisterung stimmte die Zuordnung der Arten in diese acht Gruppen – gewonnen rein durch molekulare Vergleiche – gut damit überein, was Biologen anderer Forschungsrichtungen bisher über die Verwandtschaften herausgefunden hatten. Beispielsweise besitzen näher verwandte Arten oft morphologische, physiologische oder auch Verhaltensmerkmale, die in den anderen Evolutionslinien nicht vorkommen.

So umfasst etwa die eine der herausgearbeiteten Linien alle großen Raubkatzen, die zu brüllen verstehen: Löwe, Tiger, Leopard, Jaguar und Schneeleopard. Ihr Zungenbein – ein kleiner Knochen in der Kehle, an dem die Zunge ansitzt – ist unvollständig verknöchert.

In Kürze

- Der **Stammbaum der Raubtierfamilie der Katzen** (Feliden) ergibt sich nun endlich aus DNA-Studien. Mit anderen Methoden letzte Klarheit zu gewinnen ist schwierig, denn die einzelnen Arten (Spezies) ähneln sich oft stark, und Fossilien sind rar.
- **Der letzte gemeinsame Vorfahr** aller heutigen Spezies lebte vor 10,8 Millionen Jahren in Südostasien. Er ähnelte den Leoparden. Damals spaltete sich zuerst eine Linie ab, zu der die großen brüllenden Katzen wie Löwe und Tiger gehören. Weitere sieben Linien folgten.
- Lag der Meeresspiegel tief genug, wanderten einige Feliden **auf andere Kontinente**. Dort begründeten sie oft neue Arten.
- Mit Ausnahme der Hauskatze sind heute fast alle Feliden selten geworden, viele sogar **vom Aussterben bedroht**. Die Hauskatzen stammen von einer kleinen Wildkatze des Nahen Ostens ab. Vor 10 000 bis 8000 Jahren schlossen ihre Vorfahren sich dort den frühen Ackerbauern an.

WOHIN GEHÖREN DIE KATZEN?

- zur Klasse der Säugetiere (Mammalia)
- zu den Plazentaliern (Säugern, die in der Schwangerschaft eine Plazenta ausbilden)
- zur Ordnung der Raubtiere (Karnivoren); sie bilden darin eine eigene Familie

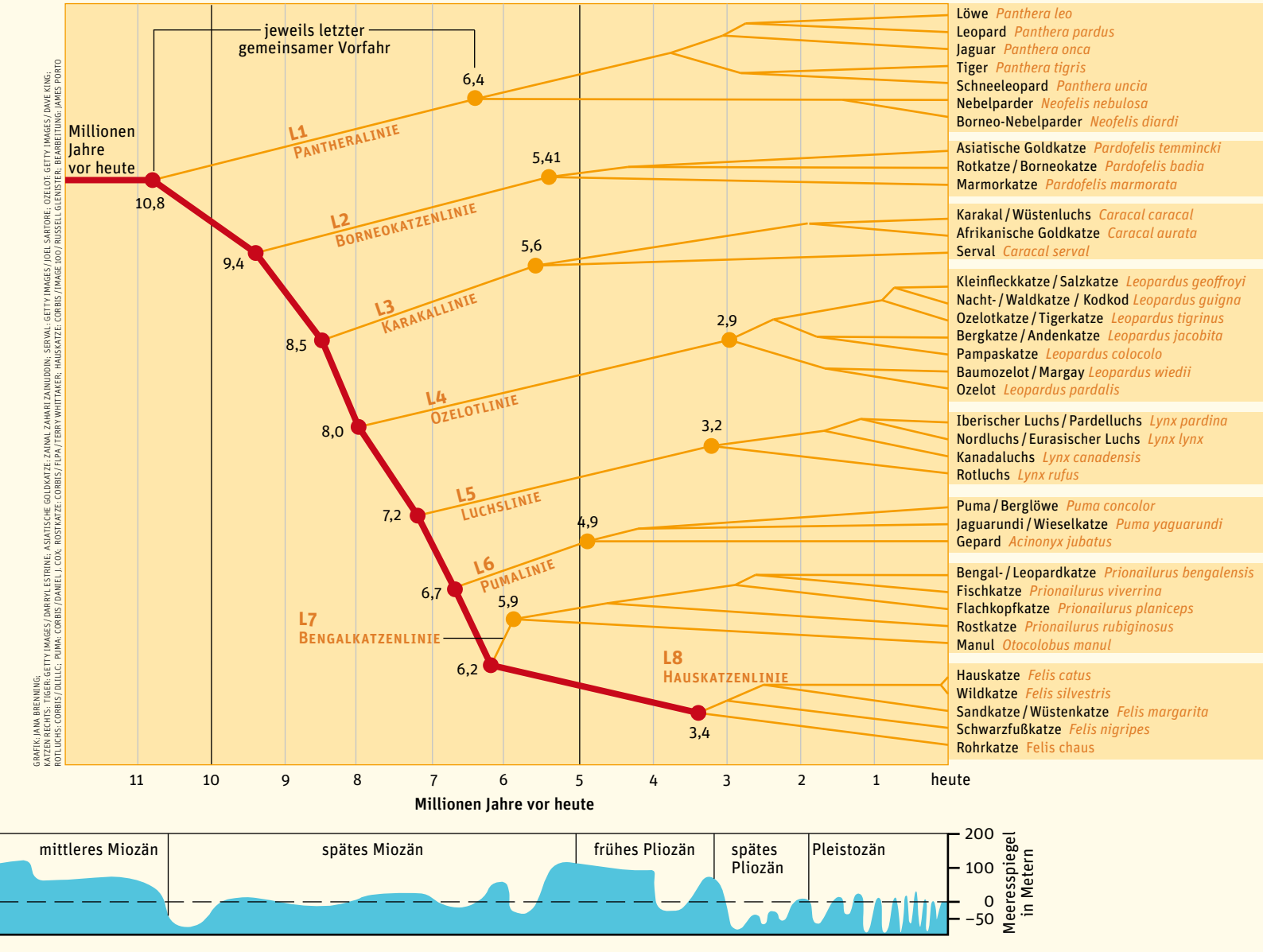
In dieselbe Gruppe gehören mit dem Nebelparder und dem Borneo-Nebelparder zwei weniger bekannte mittelgroße Arten, die wegen etwas anderer Knochen im Hals aber nicht brüllen können.

Anhand der Erbgutvergleiche vermochten wir außerdem herzuleiten, in welcher zeitlichen Reihenfolge sich die acht Hauptlinien weiter aufgespaltet hatten. Der Abgleich mit dem Alter von sicher datierten Fossilien sagte uns, wann eine neue Linie jeweils abgezweigt war. Doch wo kommen die modernen Katzen ursprünglich her? Wie haben sie sich ausgebreitet, und wie entstanden die diversen Arten?

Zunächst stellten wir zusammen, welches Verbreitungsgebiet die einzelnen heutigen Spezies haben und wo Fossilien von deren jeweiligen Vorfahren aufgetaucht sind. Zu diesen Karten nahmen wir dann das Wissen der Geologen über die unterschiedliche Höhe des Meeresspiegels zu verschiedenen Zeiten hinzu. Das heißt, wir berücksichtigten, wann und wo zwischen Kontinenten bei niedrigem Spiegel jeweils Landbrücken bestanden und wann Erdteile wegen eines zu hohen Meeresspiegels von anderen abgeschnitten waren. So konnten wir abgleichen, zu welchen Zeiten Landsäugetiere auf einen anderen Kontinent vorzudringen vermochten und wann der

DIE VERWANDTSCHAFTSVERHÄLTNISSE

Wissenschaftler verglichen DNA aller 37 Arten von Katzen und erstellten daraus diesen Stammbaum. Anhaltspunkte für die Zeitpunkte der Hauptabzweigungen lieferten Fossilien.



GRAFIK: JANA BRENNING; KATZEN RECHTS: TIGER: GETTY IMAGES / DARRYL ESTRINE; ASIATISCHE GOLDKATZE: ZAINAL ZAHARI ZAINUDDIN; SERVAL: GETTY IMAGES / JOEL SARTORE; OZELOT: GETTY IMAGES / DAVE KING; ROTLUCHS: CORBIS / DLILLC; PUMA: CORBIS / DANIEL J. COX; ROSTKATZE: CORBIS / FLPA / TERRY WHITTAKER; HAUSKATZE: CORBIS / IMAGE 100 / RUSSELL GLENSTER; BEARBEITUNG: JAMES PORTO

Rückweg unmöglich wurde. Isolierte Populationen, auch auf Inseln, entwickeln sich durch genetische Drift oft eigenständig weiter. Nicht selten entstehen dadurch schließlich eigene, neue Arten. Anhand vieler solcher Daten entwarfen wir ein Szenario der Ausbreitungsgeschichte der Katzen (siehe Karten S. 58/59).

Urahn in Asien

Bisher nahmen die meisten Forscher an, der letzte gemeinsame Vorfahr aller modernen Katzen habe vor 20 bis 9 Millionen Jahren in Europa gelebt. Als Urahn galt eine Art der Gattung *Pseudaelurus*. Diese Ansicht stützte sich rein auf Fossilfunde. (Übrigens waren das nicht die ersten Katzen überhaupt. So lebten schon vor 35 Millionen Jahren große Scheinsäbelzahnkatzen, die später ausgestorbenen Nimraviden. Die echten Säbelzahnkatzen wiederum gehörten wohl zu verschiedenen Gruppen modernerer Linien.)

Unsere Analysen lassen nun aber darauf schließen, dass alle modernen Katzen von einer asiatischen *Pseudaelurus*-Art abstammen – von welcher genau, wissen wir noch nicht sicher. Im fraglichen Zeitraum, vor 11 Millionen Jahren etwa, war die Gattung in Asien mit mehreren Spezies vertreten. Zu einer davon müssen nach unserer Überzeugung die Stammeltern aller heutigen Feliden gehört haben.

SÄBELZÄHNE

Mit den heutigen Katzen sind die ausgestorbenen echten Säbelzahnkatzen vermutlich nicht nahe verwandt. Ein Gebiss mit dergleichen dolchartigen oberen Eckzähnen entstand vermutlich mehrfach unabhängig.

ACHT ABSTAMMUNGSLINIEN

L1 Pantheralinie mittelgroße bis (sehr) große Arten (15 bis 350 Kilogramm); haben viele Regionen der Welt erobert; wo sie vorkommen, sind sie oft die dominanten Raubtiere im Ökosystem; viele erbeuten vor allem große Huftiere; die Panthera-Arten können wegen eines unvollständig verknöcherten Zungenbeins brüllen, die beiden Nebelparder-Arten nicht

L2 Borneokatzenlinie kleine bis mittelgroße Arten (2 bis 16 Kilogramm); Tropenwälder Südostasiens; über sie ist wenig bekannt; bisher stellten Taxonomen diese Arten nicht immer in dieselbe Gruppe

L3 Karakallinie mittelgroße Arten (5 bis 25 Kilogramm); Afrika; trotz des typischen, unverwechselbaren Habitus stellten viele Forscher sie bisher nicht in eine gemeinsame Gruppe

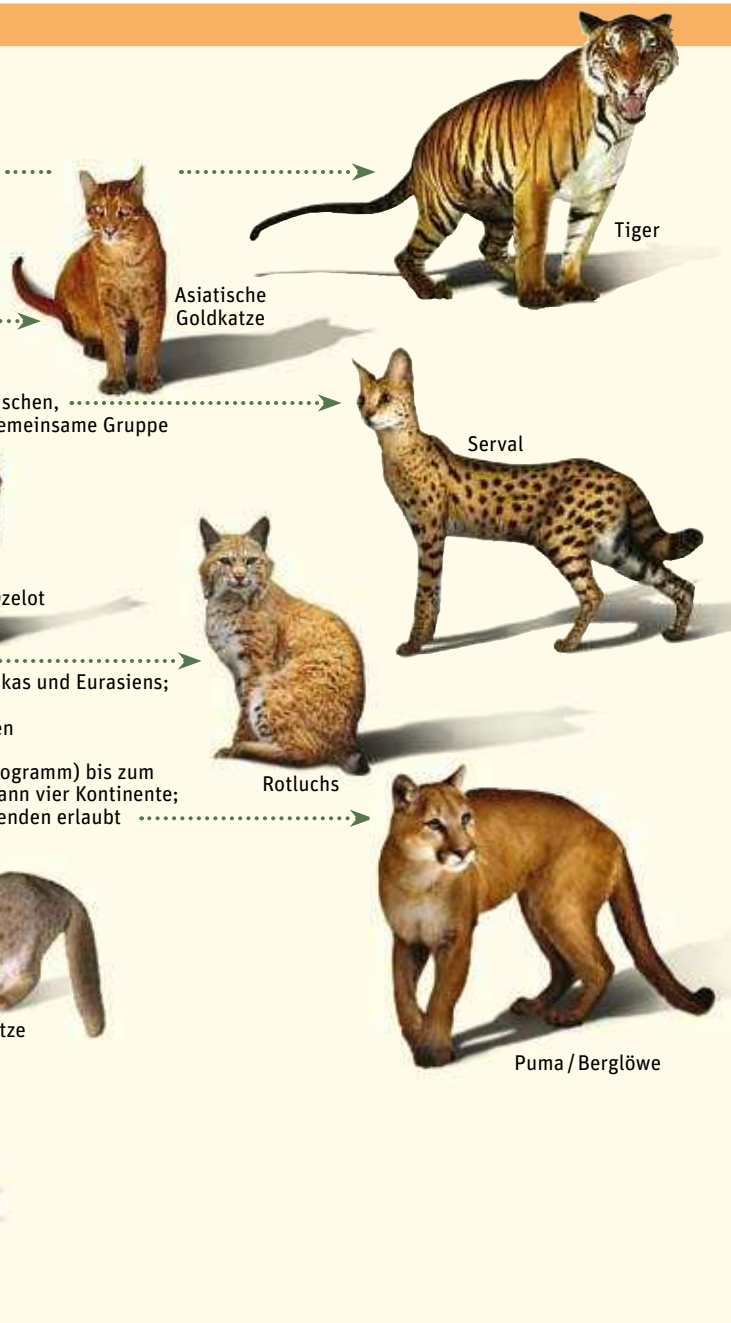
L4 Ozelotlinie kleine bis mittelgroße Arten (1,5 bis 16 Kilogramm); verschiedenste Lebensräume in Mittel- und Südamerika; die einzigen Feliden mit 36 Chromosomen (alle anderen haben 38)

L5 Luchslinie mittelgroße Arten (6 bis 20 Kilogramm); kurzer Schwanz, Haarpinsel an den Ohrspitzen; gemäßigte Zonen Nordamerikas und Eurasiens; viele erbeuten bevorzugt mittelgroße Säuger wie Hasen oder Kaninchen; mit Ausnahme des Iberischen Luchses gehörten sie zu den meistgejagten Pelztieren

L6 Pumalinie recht unterschiedliche Arten – von der Wieselkatze (3 bis 10 Kilogramm) bis zum Gepard (21 bis 65 Kilogramm); Linie stammt aus Nordamerika, besiedelte dann vier Kontinente; bis heute weit verbreitet; Pumas mancherorts häufig, Jagd auf sie in manchen Gegenden erlaubt

L7 Bengalkatzenlinie kleine Arten (2 bis 12 Kilogramm); verschiedenste Lebensräume in Asien – Mangrovenwälder bis mongolische Steppe; die Bengalkatze ist die häufigste Kleinkatzenart Asiens

L8 Hauskatzenlinie kleine Arten (1 bis 10 Kilogramm); Afrika und Eurasien; Hauskatze weltweit

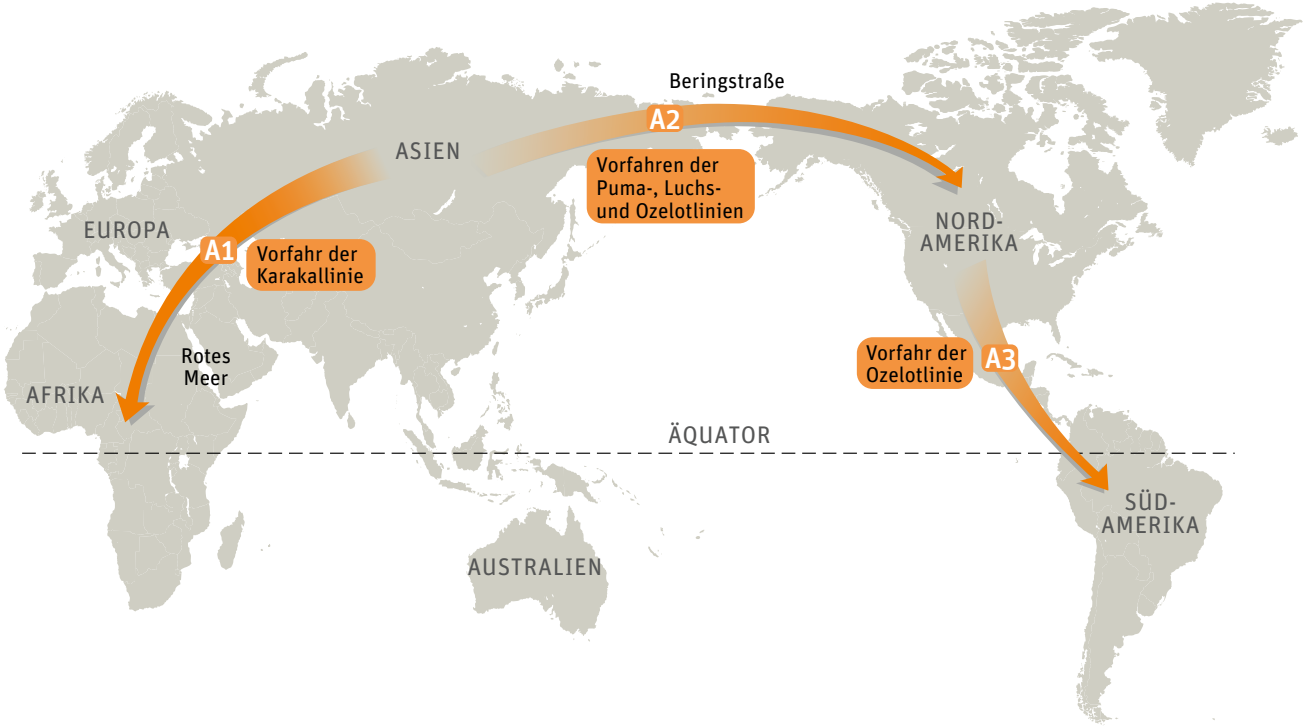


Katzen auf Wanderschaft

Die frühe Ausbreitung

Der Vorfahr aller modernen Katzen, ein leopardenähnliches Tier, lebte in Asien. Vor ungefähr neun Millionen Jahren begannen sich Nachfahren über Landbrücken nach Afrika (A1) und Nordamerika (A2) auszubreiten. Erst wesentlich später, vor frühestens drei Millionen Jahren, gelangten deren Nachfahren erstmals auch nach Südamerika (A3).

(A = Ausbreitung)



Katzenfossilien sind oft schwer genau zuzuordnen. Selbst Schädel von Löwen und Tigern ähneln einander sehr stark.

Wie spielte sich das weitere Geschehen im Einzelnen ab? Als Erstes trennte sich von den gemeinsamen Vorfahren vor ungefähr 10,8 Millionen Jahren der Ast, aus dem die Pantheralinie hervorging (Kasten S. 56/57, L1). Diese Gruppe umfasst heute die großen, brüllenden Katzen und die beiden Nebelparderspezies. Der nächste Ast spaltete sich 1,4 Millionen Jahre später ab. Auch das geschah in Asien. In dieser Linie entstanden die Borneokatzen (L2). Die Gruppe besteht heute aus drei kleinen Arten, die noch immer in Südostasien zu Hause sind, wo sie auch entstanden. Als Drittes spaltete sich die Linie der Wüstenluchse ab (L3). Sie wird heute von drei mittelgroßen afrikanischen Arten repräsentiert. Deren Vorfahren erreichten Afrika vor zehn bis acht Millionen Jahren, als der Meeresspiegel 60 Meter tiefer lag als heute und Landbrücken beidseits des Roten Meeres von der Arabischen Halbinsel nach Afrika führten. Damals gelangten Katzen zum ersten Mal auf einen anderen Kontinent (Karte oben, A1).

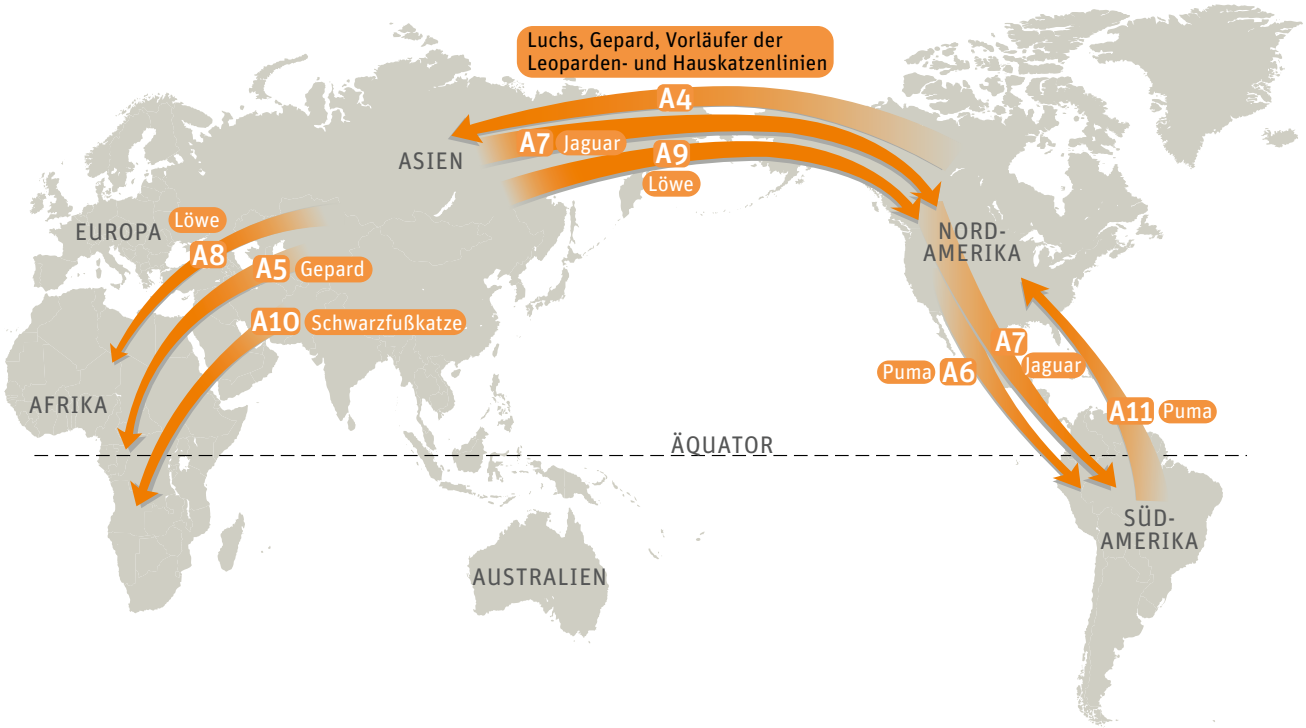
Wieso breiteten sich diese Tiere so großräumig aus? Sich in fremde Gebiete vorzuwagen liegt in der Katzennatur. Regelmäßig werden mit der Geschlechtsreife die jungen Männchen, teils auch die Weibchen, vom Ort ihrer Kindheit vertrieben. Eine wachsende Population beansprucht dadurch, falls vorhanden, über die Generationen immer mehr Raum. Außerdem sind Raubtiere oft gezwungen, wandernden Beutetierherden zu folgen. Im Fall der Katzen dürfte dies alles zusammen erklären, wieso es so häufig geschah, dass einzelne ihrer Zweige plötzlich in weit entfernten Gebieten auftauchten. Dabei half ihnen, dass sie äußerst geschickte Raubtiere sind und zudem ein fremdes Gebiet schnell gründlich erkunden. Es verwundert nicht, dass sich die Feliden in so vielen Weltgegenden ansiedelten.

Im selben Zeitraum, in dem Katzen nach Afrika einzuwandern begannen, breiteten sie sich in Asien weiter aus. Sie gelangten damals auch über die Beringlandbrücke nach Alaska (A2). Später, als die Feliden schon Asien, Europa, Afrika und Nordamerika besiedelten, stieg der Meeresspiegel, und die Landbrücken verschwanden. Nun waren manche Gruppen von ihren Herkunftspopulationen getrennt. Infolge der Isolation sowie der sich verändernden Umweltbedingungen und Habitate bildete sich eine Fülle neuer Arten heraus.

Gleich drei neue Äste entstanden kurz nacheinander in Nordamerika. Vor acht Millionen Jahren zweigte die Ozelotlinie ab (L4),

Die späteren grossen Verbreitungsschübe

Von vier Millionen bis einer Million Jahren fanden außer der ersten Expansion nach Südamerika noch weitere Ausbreitungen statt – auch wieder zurück nach Asien. Erst vor 10 000 bis 8000 Jahren kamen Pumas wieder nach Nordamerika zurück.



JANA BRENNING

Wo Katzen heute leben

Europa

Europäische Wildkatze
Iberischer Luchs
Nordluchs

Nördliches Asien

Asiatische Wildkatze
Chinesische Bergwildkatze
Nordluchs
Manul
Schneeleopard

Nordamerika

Rotluchs
Kanadaluchs
Jaguar
Puma

Tropisches Asien

Asiatische Goldkatze
Asiatischer Löwe
Rotkatze
Borneo-Nebelparder
Nebelparder
Fischkatze
Flachkopfkatze
Rohrkatze
Leopard
Bengalkatze
Marmorkatze
Rostkatze
Sandkatze
Tiger

Schwarzafrika

Afrikanische Goldkatze
Afrikanischer Löwe
Afrikanische Wildkatze
Schwarzfußkatze
Karakal
Gepard
Leopard
Serval

Südamerika

Bergkatze
Kleinfleckkatze
Jaguar
Jaguarundi
Nachtkatze
Baumozelot
Ozelot
Ozelotkatze
Pampaskatze
Puma

EUROP. WILDKATZE: NORBERT ROSING/NG COLL.; SCHNEELEOPARD: CORBIS/TOM BRAKEFIELD; KANADALUCHS: JOE MCDONALD; AFRIKAN. LÖWE: BEVERLY JOUBERT/NG COLL.; FISCHKATZE: TKOFOTO.COM; JAGUAR: MINDEN PICTURES/FOTO NATURA/SA TEAM

Ein Stammbaum wird enträtselt

Systematikern bereitete es vielfach Schwierigkeiten, die genaueren Verwandtschaftsverhältnisse innerhalb der Familie der Katzen – Feliden – zu bestimmen. Es gibt nicht genügend Fossilien, die darüber Auskunft geben könnten. Auch sind sie wegen ihrer oft ähnlichen Morphologie nicht immer klar zuzuordnen. Durch Vergleiche von DNA-Sequenzen aller 37 heutigen Katzenarten (die Hauskatze ist als eigene Art gezählt) gelang es den Autoren, sämtliche modernen Spezies in acht Gruppen zu sortieren – entsprechend acht Stammlinien.

Eine erste Herausforderung war es, alle Blut- oder Gewebeproben zu beschaffen. Denn manche Arten sind selten und leben in abgelegenen Regionen. Als ein Anhaltspunkt zur Datierung der Hauptabzweigungen dienten DNA-Sequenzen von sieben Schleichkatzenarten (wie Mungos und Zibetkatzen), die den Katzen nahestehen.

Die Forscher untersuchten DNA vom X- und vom Y-Chromosom sowie von Mitochondrien (Zellorganellen, die auch Erbgut enthalten und von der Mutter vererbt werden). Sie konzentrierten sich auf die Sequenzen von 30 Genen – über 20 000 Nukleotide pro Art. Fast die Hälfte der Sequenzen zeigte Abweichungen zwischen den Katzenarten. Anhand dessen ließen sich die Verwandtschaftsgruppen, deren Alter und deren Nähe zueinander festmachen. (Mutationen in Gensequenzen ereignen sich mehr oder weniger regelmäßig. Solche, die sich nicht verheerend auswirken, häufen sich mit der Zeit an. Der Vergleich von Zahl und Art solcher Veränderungen zeigt Evolutionslinien auf. Nahe verwandte Arten tragen weit gehend dieselben Mutationen, die in ihrer Linie schon lange mitgeschleppt wurden.)

Nachdem die Forscher so die Äste und feineren Verzweigungen im Felidenstammbaum erkannt hatten, versuchten sie, die Gabelungen zu datieren. Für dutzende Katzenfossilien existieren plausible Altersbestimmungen. Zudem gelten manche der fossilen Spezies als Bindeglied, als letzter gemeinsamer Vorfahr aller Angehörigen einer heutigen Gruppe. Dank 16 sicherer Fossildatierungen ließen sich einige der Verzweigungen zeitlich festlegen. Das diente als Gerüst, um alle genanalytisch erschlossenen Gabelungen einzuordnen. In der Annahme, dass Mutationen sich in gleichmäßiger Rate anhäufen, errechneten die Forscher, wie viel Zeit seit den einzelnen Abzweigungen jeweils verstrichen ist.

GENOM DES STUBENTIGERS

Erst kürzlich wurde das komplette Genom einer Hauskatze sequenziert – und zwar das einer Abessinierkatze mit Namen Cinnamon (Zimt). Mehr oder weniger vollständig liegen bereits die DNA-Sequenzen von etwa 30 Säugetierarten vor. Mit diesen Daten blicken Evolutionsforscher nun von einer anderen Seite auf die 100 Millionen Jahre währende Geschichte der modernen Säuger.

KRISTINA VARFSTRÖM, UNIVERSITY OF MISSOURI

Von der Abessinierkatze Cinnamon (Zimt) stammt die DNA, an der Forscher das Katzengenom entzifferten.

vor 7,2 Millionen Jahren die der Luchse (L5) und vor 6,7 Millionen Jahren die der Pumas (L6). Die Linie der Ozelots spaltete sich in Nordamerika in zwei Arten. Aus der Luchslinie gingen vier Spezies hervor. Der Pumalinie entstammten der Puma, der Jaguarundi und der Amerikanische Gepard. Fossilien aus Amerika beweisen für sie alle, dass sie ursprünglich dort entstanden.

Südamerika war über viele Millionen Jahre von Nordamerika isoliert gewesen. Erst vor drei bis zwei Millionen Jahren entstand der Isthmus von Panama. Mehrere nordamerikanische Katzen breiteten sich nun nach Süden aus. Dort lebten noch keine höheren – plazentalen – Säugetiere, somit keine Karnivoren (höhere Raubsäugetiere, die ihre Feten über eine Plazenta ernähren). Stattdessen gehörte Südamerika den Beuteltieren. Es gab unter ihnen erfolgreiche räuberische Fleischfresser. Aber mit den gewandten, blitzschnellen Katzen aus dem Norden konnten sie es nicht aufnehmen. Diese waren bereits zu passionierten Räubern geworden – zum Inbegriff von Beutegreifern. Rasch verdrängten überlegene Säuger aus dem Norden die meisten Beuteltiere. Die Katzen der Ozelotlinie bringen es in Südamerika heute auf sieben Arten (A3, L4).

Als die Eismassen über Nordamerika nach dem Ende der letzten Eiszeit vor rund 12 000 Jahren abschmolzen, entstanden dort nach und nach die typischen Wald- und Prärielandschaften. Ereignisse, über deren Ursache die Experten noch streiten, löschten in dieser Region in relativ kurzer Zeit rund 40 Säugetierarten aus – drei Viertel der großen Spezies: darunter Mammuts und Mastodons, auch eine besonders große, gedrungene Wolfsart (englisch *dire wolf* genannt), riesige, flachgesichtige Bären, Riesenfaultiere, der Amerikanische Löwe, Säbelzahnkatzen, Pumas und Geparde. Ein paar der Katzenarten überlebten aber auf anderen Erdteilen. Geparde waren einige Millionen Jahre vorher über die Beringbrücke nach Asien gekommen (A4). So erreichten sie schließlich auch Afrika (A5), wo sie heute zu Hause sind. Die Pumas überlebten in Südamerika. Von dorther besiedelten sie viel später erneut den nordamerikanischen Kontinent (A11).

Tiger haben knapp überlebt

Ungefähr zur gleichen Zeit wie die Geparde gelangten auch die Vorfahren der so genannten Bengal- oder Leopardkatzen von Amerika über die Beringbrücke nach Asien und ebenso die Urahnen unserer Hauskatzen (L7, L8, A4). Genauer gesagt lösten sich beide Linien von ihren jeweiligen Stammeltern in Nordamerika. Der Bengalkatzenlinie, die in Asien gut gedieh, entstammen weitere kleine Arten: in Indien die Rostkatze, in der Mongolei der Manul, in Indonesien die Flachkopfkatze und in mehreren verstreuten Gebieten die Fischkatze.

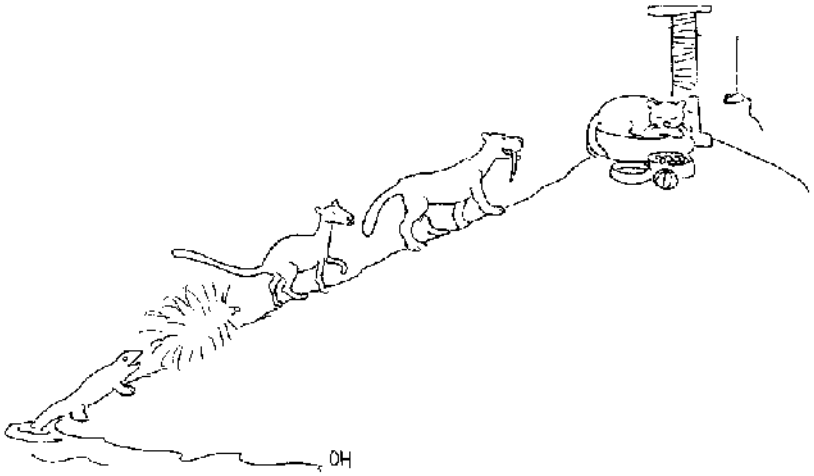
Auch die Pantheralinie (L1) breitete sich damals in Asien noch weiter aus. Tiger von 320 Kilogramm – schwerer als heutige – machten Indien, Indochina, die Sundainseln und China unsicher. In Zentralasien kamen die Schneeleoparden bis hoch in den Himalaja und ins Altaigebirge. Leoparden eroberten weite Teile

Asiens und kamen auch nach Afrika. Vor etwa drei bis vier Millionen Jahren, im späten Pliozän, wanderten Jaguare (A7) und Löwen (A9) in Nordamerika ein. Beide Arten starben dort am Ende der letzten Eiszeit aus. Doch die Jaguare waren längst auch in Südamerika heimisch (A7). Löwen wiederum hatten auch Afrika besiedelt (A8), das ihnen auf Dauer günstigere Bedingungen bot als Europa, Asien und Amerika. Außer einer Restpopulation von vielleicht 200 Tieren in einem Schutzgebiet Westindiens ist der Asiatische Löwe heute verschwunden. Die Gruppe, in der starke Inzucht herrscht, lebt im Gir-Wald in der Provinz Gujarat. Aber auch der Bestand Afrikanischer Löwen zählt nur noch etwa 30 000 Tiere, und er geht weiter bedrohlich zurück.

Der Tiger wäre vor einigen Jahrzehntausenden beinahe ausgestorben, wie unsere genetischen Analysen zeigen. Die heutigen Tiere ähneln einander genetisch so stark, dass die Population vor relativ kurzer Zeit einen Flaschenhals passiert haben muss, wie Genetiker sagen. Sie meinen damit, dass die jetzigen Tiger auf eine sehr kleine Population mit wenigen Individuen zurückgehen, die damals überlebte. Hierzu passt die Katastrophe, die Ausbrüche des Toba auf Nordsumatra vor ungefähr 73 000 Jahren anrichteten. Viele Säugetiere Ostasiens gingen damals zu Grunde. Von den in der Region vorher weit verbreiteten Tigern kamen offenbar nur ganz wenige davon. Diese begründeten eine neue Rasse, die sich dann wieder über das Gebiet ausdehnte.

Woher kommen unsere Hauskatzen? Die Geschichte ihrer Vorfahren beginnt in den Wäldern und Wüsten am Mittelmeer und angrenzenden Regionen. In diesen Lebensräumen waren einige recht kleine Katzenarten entstanden, Tiere von weniger als zehn Kilogramm Gewicht: die Rohrkatze, die Sand- oder Wüstenkatze, die Schwarzfußkatze – sowie die Wildkatze *Felis silvestris*, die sich mit vier, vielleicht auch fünf, gut unterscheidbaren Unterarten (Subspezies) in Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika, dem südlichen Afrika, Zentralasien und China ausbreitete. Von der Wildkatze stammt nach heutiger Überzeugung die Hauskatze ab. Aber welche ihrer Unterarten stellte die Vorfahren? Wo geschah die Domestikation und damit eines der erfolgreichsten Experimente in unserer Geschichte? Mit einer breit angelegten molekulargenetischen Vergleichsstudie fand der junge Forscher Carlos Driscoll von der University of Oxford die Antwort. Er verglich Erbsequenzen von Hauskatzen aus aller Welt mit denen der verschiedenen Wildkatzensubspezies.

Demnach tragen alle Hauskatzen genetische Kennzeichen, die zu denen von Wildkatzen aus Populationen des Nahen Ostens passen. Anscheinend erfolgte eine Domestikation vor 10 000 bis 8000 Jahren mehrmals – aber offensichtlich immer im Gebiet des so genannten fruchtbaren Halbmonds, und zwar in der Zeit, als die Menschen dort mit dem Ackerbau begannen und sich bei ihren Feldern in kleinen Dörfern ansiedelten. Jene frühen Bauern kultivierten Weizen und Gerste. Möglicherweise zog es die Wildkatzen zu den Getreidespeichern, wo es von Mäusen und dergleichen wimmelte. Zoologen halten es für gut möglich, dass die kleinen, aufmerksamen Räuber sich von selbst immer mehr an die Menschen anpassten, so dass sie mit der Zeit umgänglicher und fügsamer wurden. Für ihre Nahrung sorgten sie allein, und die Bauern duldeten sie gern als Mäusefänger. So banden sich diese zunehmend zahmeren Katzen immer fester an den Menschen.



Heute leben weltweit schätzungsweise 600 Millionen Hauskatzen. Ihr Aussterben muss man nicht befürchten – im Gegensatz zu dem der meisten anderen Feliden. Im 19. Jahrhundert wurde, vor allem in Nordamerika, die gezielte Rassenzucht Mode. Um die 50 bis über 70 verschiedene Hauskatzenrassen führen die einzelnen Organisationen der Katzenfreunde an. Zwar sind bei manchen dieser Rassen andere Arten (vielleicht teils auch Unterarten der Wildkatze) eingekreuzt, doch alle Hauskatzen haben zunächst ihre Wurzeln in Vorderasien.

Die hier erzählte Evolutionsgeschichte der Raubtierfamilie der Feliden gibt einen Eindruck von einem jungen Forschungsfeld, das Abstammungsverhältnisse mit genetischem Rüstzeug aufschlüsselt. Jede biologische Art, nicht nur die Katzen, trägt in ihrem Genom Spuren ihrer Vergangenheit. Ihr Erbgut erzählt von ihrer Ausbreitung und Herkunft, ihrer Verwandtschaft, den Wanderungen der Vorfahren und von Populationsengpässen, die ihre Ahnen überstanden. ◁

Stephen J. O'Brien (links) leitet am Nationalen Krebsinstitut der amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstitute in Bethesda (Maryland) das Labor für genomische Vielfalt, das er Ende der 1980er Jahre gründete. Bei »Spektrum der Wissenschaft« erschienen schon mehrere Artikel von ihm. 2006 veröffentlichte er einen Chromosomenatlas der Säugetiere. **Warren E. Johnson** forscht seit 1992 im selben Labor, nachdem er in Tierökologie promoviert hatte.

Johnson, W. E. et al.: The Late Miocene Radiation of Modern Felidae: A Genetic Assessment. In: Science 311, S. 73 – 77, 6. Jan. 2006.

O'Brien, S. J., Johnson, W. E.: Big Cat Genomics. In: Annual Review of Genomics and Human Genetics 6, S. 407 – 429, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951085.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Die artesischen Quellen von Dilmun

Auf der Insel Bahrain im Persischen Golf sprudelten bis vor Kurzem Quellen, die dort vor vier Jahrtausenden eine Hochkultur erblühen ließen und bereits im Gilgamesch-Epos erwähnt sind. Ihre rätselhafte Herkunft konnte nun geklärt werden. Doch heute sind sie durch Übernutzung versiegt.

Von Randolf Rausch,
Heiko Dirks und Katlen Trautmann

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Brütende Hitze lastet über Bahrain, der mit fünfzig Kilometer Länge und zwanzig Kilometer Breite größten unter den sechs Inseln im Persischen Golf. Während Said einen Schluck Tee trinkt, blickt er auf sein kleines Stück Land, auf dem ein paar vertrocknete Dattelpalmen stehen. Seine Gedanken schweifen zurück in die Zeit seiner Kindheit. Damals besaß seine Familie eine große Dattelplantage. In der Nähe trat Wasser aus einer Quelle. Said und den Jungen aus der Nachbarschaft machte es großen Spaß, in dem kühlen Nass zu planschen. Heute sprudelt kein Wasser mehr. Das Öl sei schuld, sagen die Leute. Said schert sich nicht darum. So gern er an die alten Zeiten zurückdenkt, ist er doch froh, nicht mehr die schwere Arbeit auf der Dattelplantage verrichten zu müssen. Seine Söhne haben gut bezahlte Jobs bei großen Firmen in Manama, der Hauptstadt der Insel, und versorgen ihn mit allem, was er benötigt.

Die Quellen, die heute versiegt sind, waren nicht nur in Saids Jugend das kostbarste Gut der Inselbewohner. Schon vor rund 4000 Jahren bildeten sie die Grundlage einer Hochkultur. Benannt ist sie nach dem mythologischen Ort Dilmun, der in sumerischen Keilschrifttexten erwähnt wird. Bis heute weiß man wenig über diese frühe Zivilisation, doch Altertumsforscher zählen sie zu den großen Seefahrerkulturen der antiken Welt.

Verantwortlich für ihren Aufstieg war neben den Wasservorkommen wohl die strategische Lage von Dilmun. Alle Schiffe auf dem Weg zwischen Mesopotamien, Arabien (Magan), Afrika und Indien (Meluha) machten hier Station. Die Insel war Versorgungshafen für Trinkwasser, aber auch Umschlagplatz für Handelsgüter, was einen nie versiegenden Warenstrom garantierte. Rund um blühende Dattelpalmenoasen gediehen Gemüse und Getreide. Im Meer gab es Fisch im Überfluss. Den Wohlstand Dilmuns belegen archäologische Funde, wonach die Menschen in Häusern mit Steinfußböden wohnten.

Ein Relief aus Uruk zeigt Gilgamesch, den Helden des gleichnamigen Epos, und den sumerischen Gott Enki, wie er aus dem Apsu (einem unterirdischen Süsswasserozean) das Wasser auf die Erde bringt.

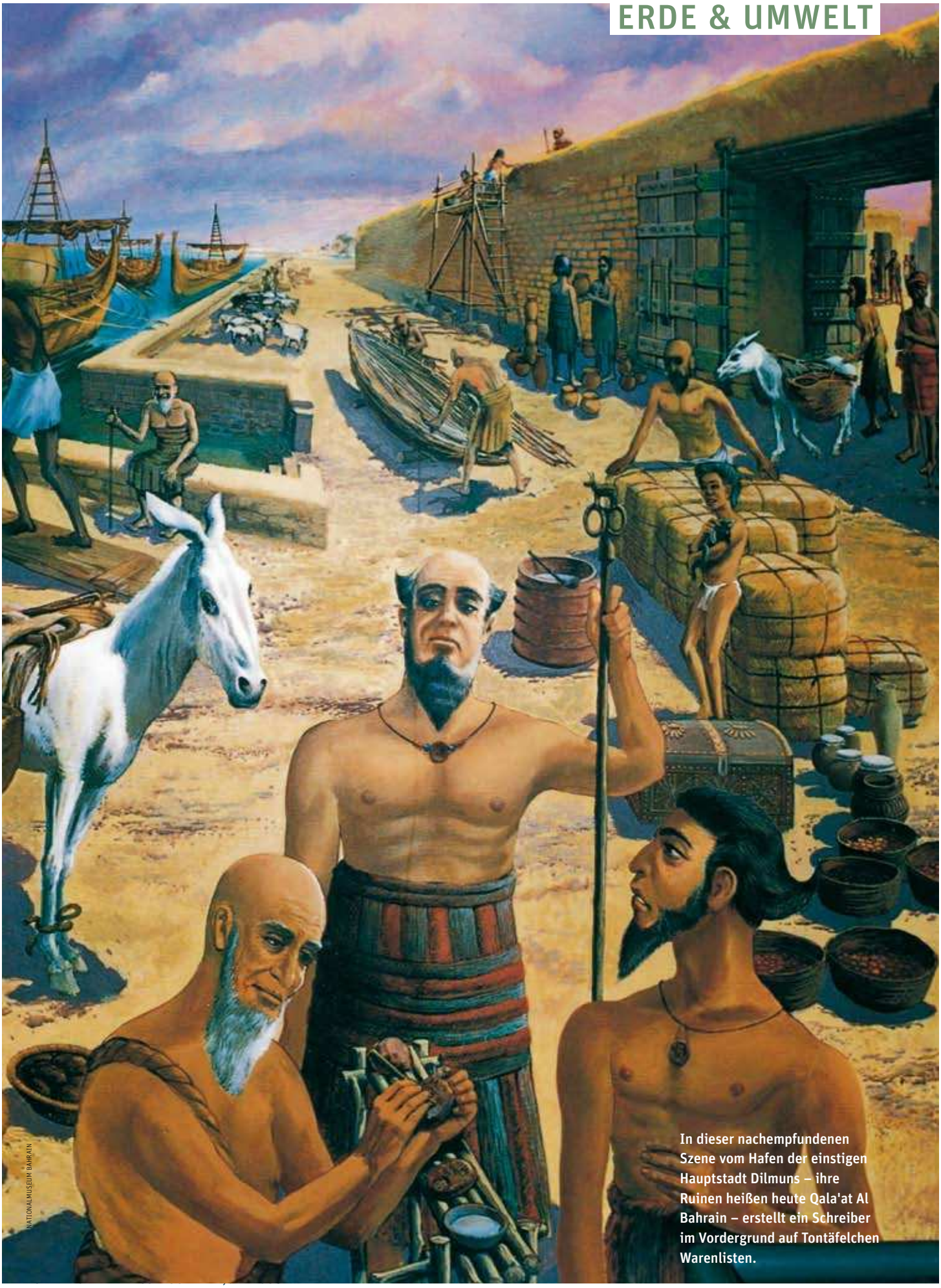
NATIONAL MUSEUM BAHRAIN

Ein paradiesischer Ort

Die Insel ist auch in einer der ältesten literarischen Dichtungen erwähnt: dem Gilgamesch-Epos. Dort erscheint sie als »paradiesischer Ort«, der ewiges Leben verheißt. Dass aber auch hier gestorben wurde, beweisen die rund 170 000 Gräber auf der Insel. Sie bilden den größten prähistorischen Friedhof der Welt. Aus seinen Ausmaßen schließen Archäologen, dass auf Bahrain zur Blütezeit der Dilmun-Kultur bis zu 46 000 Menschen lebten – eine für damalige Verhältnisse drangvolle Enge.

Möglich wurde diese hohe Bevölkerungsdichte durch den Überfluss an Süßwasser. Es schuf die Voraussetzung, um in einer eigentlich wüstenartigen Region mit nur rund hundert Millimeter Niederschlag im Jahr und einer extrem hohen Verdunstungsrate – bei einer Jahresmitteltemperatur von 26 Grad Celsius – intensive Landwirtschaft betreiben zu können. Außerdem boten die Quellen von Dilmun für die Schiffe im Persischen Golf die einzige strategisch sichere und leicht zugängliche Möglichkeit zur Versorgung mit Süßwasser.

Über die Herkunft der Quellen wurde seit frühester Zeit spekuliert. In der sumerisch-ba-



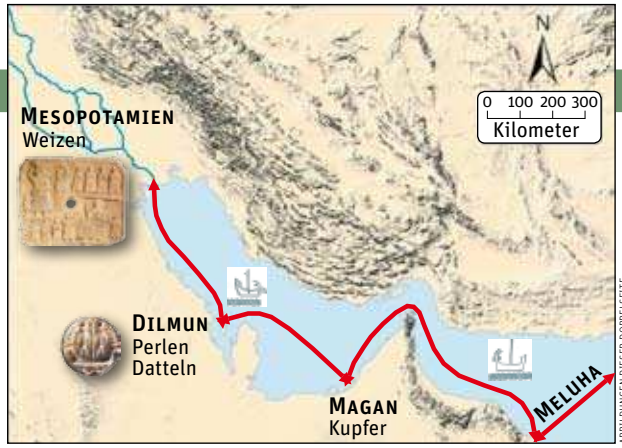
NATIONALMUSEUM BAHRAIN

In dieser nachempfundenen Szene vom Hafen der einstigen Hauptstadt Dilmuns – ihre Ruinen heißen heute Qala'at Al Bahrain – erstellt ein Schreiber im Vordergrund auf Tontäfelchen Warenlisten.

Handels- und Versorgungszentrum

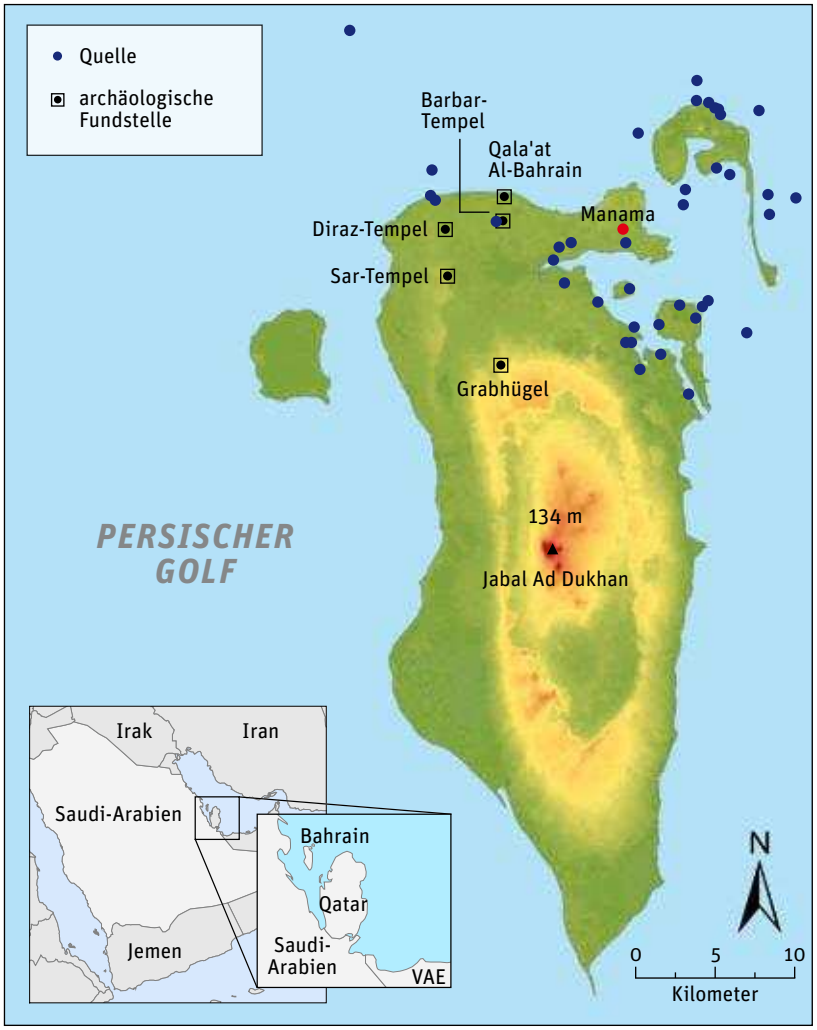
In der Mitte des Persischen Golfs gelegen, war die Insel Bahrain einst eine strategisch günstige Zwischenstation für den Seehandel zwischen Mesopotamien, Afrika, Indien (Meluha) und Arabien (Magan). Das galt umso mehr, als sie mit ihren artesischen Quellen über die einzigen Trinkwasservorräte weit und breit verfügte. Als wichtigstes Gut wurde Kupfer aus dem Oman nach Mesopotamien transportiert.

Die Insel selbst war für die Qualität ihrer Perlen bekannt. Nach Aussage der Perlenfischer fanden sich die schönsten und wertvollsten Exemplare im Austrittsbereich der untermeerischen Quellen. In der Mischungszone von Süß- und Salzwasser herrschten demnach die besten Bedingungen für das Perlenwachstum. Die Perlentaucher nutzten die untermeerischen Quellen auf ihren mehrmonatigen Fahrten auch zur Trinkwasserversorgung und füllten das Wasser in Ziegenschläuche. Andere Exportgüter Dilmuns waren Datteln und andere landwirtschaftliche Erzeugnisse.



ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: RANDOLF RAUSCH UND HEIKO DIRKS

Auf dieser Karte der Handelsroute zwischen den wichtigsten Kulturen am Persischen Golf zur Zeit von Dilmun sind die jeweiligen Hauptausfuhrprodukte verzeichnet. Die ersten Schiffe waren nach Hinweisen auf Siegeln wahrscheinlich aus Schilf gebaut. Trotzdem hatten sie eine Ladekapazität von bis zu 20 Tonnen. 1977 bewies Thor Heyerdahl mit der Tigris-Expedition, dass sich der Persische Golf mit solchen Schiffen befahren ließ.



Bahrain liegt nur wenige Kilometer vom arabischen Festland entfernt im Persischen Golf. Die nun versiegten Quellen konzentrierten sich auf den Norden der Insel. Dort liegen auch die bedeutendsten archäologischen Relikte der Dilmun-Kultur.

bylonischen Mythologie ruht die Erde mit ihren Meeren auf einem unterirdischen Süßwasserozean, dem »Apsu«. Dieser sollte sämtliche Quellen und Flüsse an der Oberfläche speisen. Bewacht wurde er von Enki, dem sumerischen Gott der »Weisheit und des Süßwassermeeres unter der Erde«. Nach dem Gilgamesch-Epos war er es auch, der die oberirdischen Quellen nach Dilmun brachte. Noch heute ist die alte Vorstellung von den übereinander liegenden Ozeanen im Wort »Bahrain« lebendig: Die wörtliche Übersetzung aus dem Arabischen bedeutet »zwei Meere«.

Aus moderner Sicht erscheint die sumerische Erklärung gar nicht so falsch. Das Wasser von Dilmun stammte tatsächlich aus einem unterirdischen Reservoir. Nur handelte sich dabei nicht um einen weltumspannenden Ozean. Vielmehr war es ein zwar riesiger, aber auf die Arabische Halbinsel begrenzter Grundwasserleiter (Aquifer), der sich während der letzten Eiszeit gefüllt hatte. Sein Inhalt trat auf Bahrain in Form artesischer Quellen zu Tage. Das ergaben umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) im Auftrag der saudischen Regierung. Sie stützen sich auf Untersuchungen des Königreichs, die seit den 1980er Jahren durchgeführt wurden.

Insgesamt haben wir mit unseren Kollegen mehrere tausend Brunnen erfasst und unter anderem deren Wasserspiegel gemessen. Chemische Analysen der Brunnenwässer lieferten Informationen zur Qualität und Mineralisierung des Grundwassers. Aus Pumpversuchen, bei denen die Absenkung des Wasserspiegels nach dem Einschalten einer Pumpe beobachtet

wird, ermittelten wir hydrogeologische Kennzahlen wie die Durchlässigkeit und das Speichervermögen des Aquifers. Die geologischen Daten der Brunnenbohrungen gaben auch Hinweise zu Aufbau und Ausdehnung der Gesteinsschichten. Mit dem Computer erstellten wir schließlich ein Grundwassermodell, das alle Informationen zusammenfasst und so Aussagen, zum Beispiel über den Wasserspiegel oder die Fließrichtung, auch für Gegenden ermöglicht, in denen es keine Brunnen gibt.

Grüngürtel in der Wüste

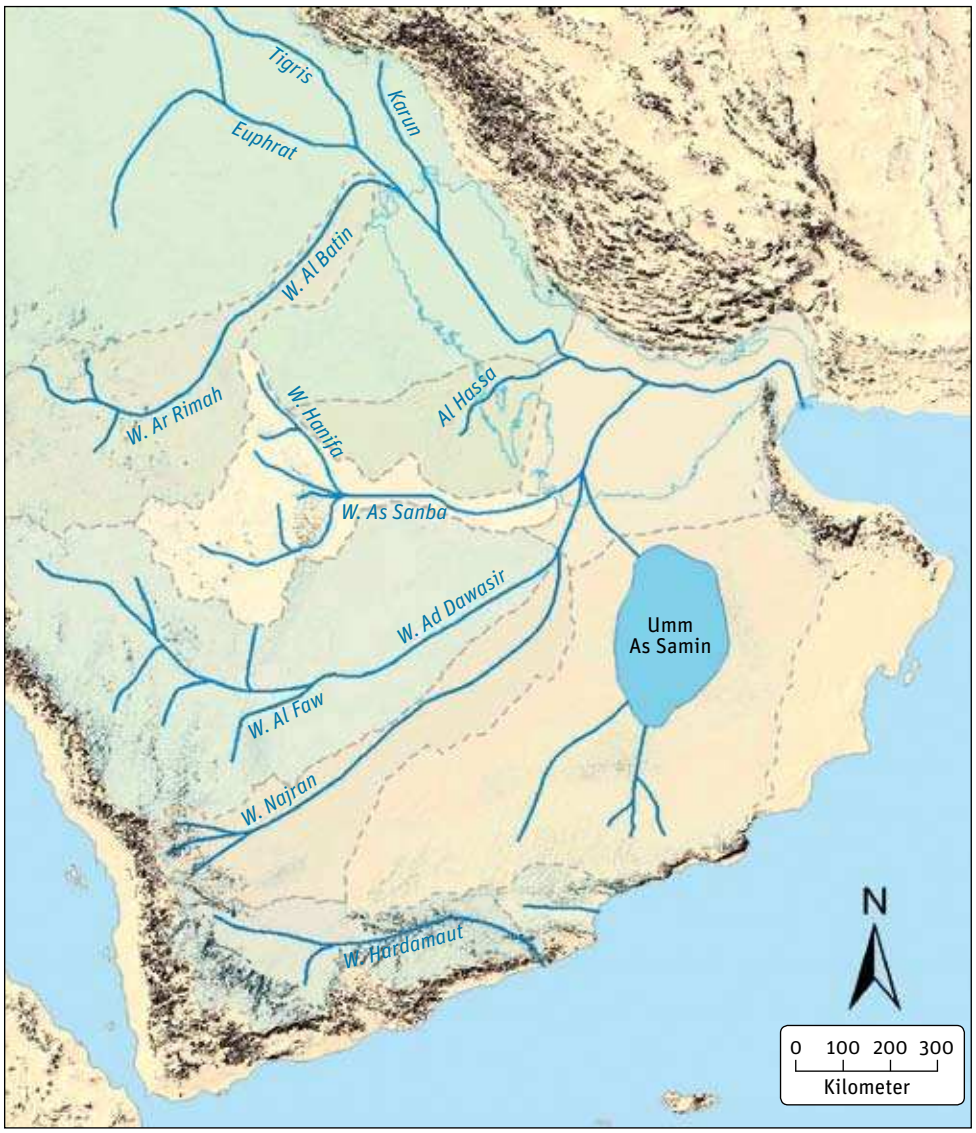
Noch 1973 äußerte der ein Jahr später verstorbene Geologe Hans Georg Wunderlich von der Universität Stuttgart die Vermutung, das Grundwasser in Bahrain komme von Osten: Es stamme aus dem Zagrosgebirge im Iran, wo auch heute noch reichlich Niederschlag fällt. Wunderlich nahm an, dass Regenwasser dort versickert, den Persischen Golf unterströmt und an kissen- und linienförmigen Salzdomen auf der anderen Seite wieder aufsteigt. Durch die neuen Untersuchungen ist diese These jedoch widerlegt.

Auf Bahrain waren bis zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts mindestens 36 größere Quellen bekannt. Davon traten 15 an Land und 21 auf dem Meeresboden nahe der Küste aus. Sie schufen im Norden der Insel einen etwa drei Kilometer breiten Grüngürtel. In ihm lagen der Hafen und die größten Ansiedlungen, deren Überreste heute noch zu bewundern sind. Die Quellen an Land lieferten etwa 2,2 und die im Meer 0,6 Kubikmeter Wasser pro Sekunde. Letztere befanden sich ursprünglich ebenfalls auf dem Trockenen und sind durch den Anstieg des Meeresspiegels versunken.

Auch auf der Arabischen Halbinsel existieren solche artesischen Brunnen. Zwei besonders ergiebige Quellgebiete sind die Oasen Al

In Kürze

- Schon in sumerischer Zeit entwickelte sich auf der Insel Bahrain, die damals Dilmun hieß, eine **Hochkultur**, in der die Menschen in Häusern mit Steinfußböden wohnten.
- Reiche Süßwasservorkommen und die günstige Lage inmitten des Persischen Golfs machten die Insel zur **Versorgungsstation** für die Schifffahrt und zum Umschlagplatz für Handelsgüter.
- Bis in die 1970er Jahre war jedoch unbekannt, woher das **Süßwasser** stammte. Untersuchungen seither ergaben, dass es **fossilen Ursprungs** ist: Es sammelte sich während der Eiszeit in Grundwasserleitern unter der Arabischen Halbinsel.



Im Pliozän (vor 5,3 bis 1,8 Millionen Jahren) und zeitweise während der Eiszeit war das Klima wesentlich feuchter als heute. Damals entwässerten Flüsse die Arabische Halbinsel, und es gab einen großen Binnensee, wo sich heute die Sabkha (ein flaches, gelegentlich überschwemmtes Becken) Umm As Samin befindet.

BEIDE FOTOS: RANDOLF RAUSCH UND HEIKO DIRKS

Im Bereich des As Summan-Plateaus in Saudi-Arabien streicht der Umm-Er-Radhuma-Aquifer (siehe Kasten rechts) aus. Hier sind typische Ver-karstungsformen wie Höhlen und Dolinen zu erkennen.

Hassa und Al Qatif. Erstere liefert allein rund zehn Kubikmeter Wasser pro Sekunde. Allerdings liegt sie rund fünfzig Kilometer im Landesinneren und damit weitab vom Seeweg. Die Oase Al Qatif befindet sich dagegen an der Küste. Trotz ihrer Schüttung von rund zwei Kubikmetern pro Sekunde besaß sie aber nur geringe Bedeutung für die Versorgung von Handelsschiffen, weil sie keinen Schutz vor Überfällen aus dem Hinterland bot. Außerdem war das Wasser dort so mineralreich, dass es sich zwar zur Landwirtschaft, aber kaum als Trinkwasser eignete.

Allein die beiden großen Oasen auf dem Festland machen bereits deutlich, dass das Grundwassersystem nicht auf Bahrain beschränkt ist. Laut den aktuellen Untersuchungen erstreckt es sich über den gesamten Ostteil der Arabischen Halbinsel – vom Irak über Kuwait, Saudi-Arabien, Bahrain, Qatar und die Emirate bis nach Oman und in den Jemen. Es besteht aus vier mächtigen Grundwasserleitern, die stockwerkartig übereinanderliegen und teilweise miteinander verbunden sind. Mit einer Gesamtfläche von rund 850 000 Quadratkilometern hat es die zweieinhalbfache Ausdehnung Deutschlands. Tatsächlich ist es eines der größten zusammenhängenden Karstaquifersysteme der Welt.

Die Grundwasserleiter heißen von unten nach oben Aruma-, Umm-Er-Radhuma-, Dammam- und Neogen-Aquifer. Sie sind intensiv verkarstet und zeigen die dafür typischen Strukturen wie Karstwannen und -spalten, Dolinen (trichterförmige Senken), Höhlen und ein durch Kalklösung erweitertes Kluftsystem.

Die vier Gesteinsschichten bestehen überwiegend aus Karbonaten (Kalksteinen sowie teilweise Dolomit), Sulfaten (Anhydrit und Gips) und – untergeordnet – Tonsteinen. Ihre

Der Barbar-Tempel ist die spektakulärste archäologische Ausgrabung aus der Dilmun-Kultur. Das Bild zeigt die Überreste des Tempels und die heilige Quelle. Der aus Bronze bestehende Stierkopf wurde bei den Ausgrabungen im Tempel gefunden.

Quellen als Kultstätten

Die Quellen von Dilmun waren einst heilig. An ihnen entstanden deshalb Kultstätten. Im Barbar-Tempel, dem bislang spektakulärsten Fund aus der Dilmun-Kultur, ist eine Steinkammer über einer Quelle errichtet. Eine Zeremonientreppe führt hinab zu dem Brunnen. Von dort gehen unterirdische Kanäle (»Qanate« oder »Faladsche« genannt) aus, die das Wasser auf die Felder leiteten.

Vermutlich organisierte die Priesterschaft die Verteilung. Das System muss jedenfalls sehr effektiv gewesen sein, da sich die besiedelten Gebiete in der frühen Dilmun-Periode im zweiten vorchristlichen Jahrtausend sehr rasch entwickelten. Die landwirtschaftlichen Flächen waren um die Quellen herum angeordnet und umfassten 50 bis 150 Quadratkilometer. Wie die geodätische Vermessung des ehemaligen Bewässerungssystems ergab, lagen sie maximal zehn Meter über dem Meeresspiegel. Offenbar erreichte die artesische Überlaufhöhe der Quellen nur dieses relativ niedrige Niveau.

BEIDE FOTOS: NATIONALMUSEUM BAHRAIN

Gesamtdicke schwankt zwischen 800 und 2500 Metern und nimmt zum Persischen Golf hin zu. Abgelagert wurde die Schichtfolge in der Oberkreide und im Tertiär – vor 75 bis 1,8 Millionen Jahren – auf der so genannten Arabischen Plattform. Damals war der größte Teil der Region vom Meer bedeckt.

Den Hauptteil des Grundwassers leitet der Aquifer Umm Er Radhuma. Auf Bahrain tritt er allerdings nicht an die Oberfläche. Die Quellen hier speiste der darüberliegende Dammam-Aquifer. Zwischen beiden befindet sich die so genannte »Rus-Formation«, die aus Anhydrit, Gips und geringen Mengen an Kalkstein besteht.

Die einzelnen Schichten verhalten sich unterschiedlich. So ist der Anhydrit praktisch wasserundurchlässig. Doch nicht überall isolieren die Trennschichten die Grundwasserleiter vollständig voneinander. So sind sie an Aufwölbungen (so genannten »Antiklinalen«) von Natur aus weniger dick und werden durch Kräfte aus dem Erdinnern mechanisch beansprucht. Vor allem hier entstehen deshalb Klüfte im Gestein, durch die das Grundwasser in gewissem Ausmaß hindurchtreten kann.

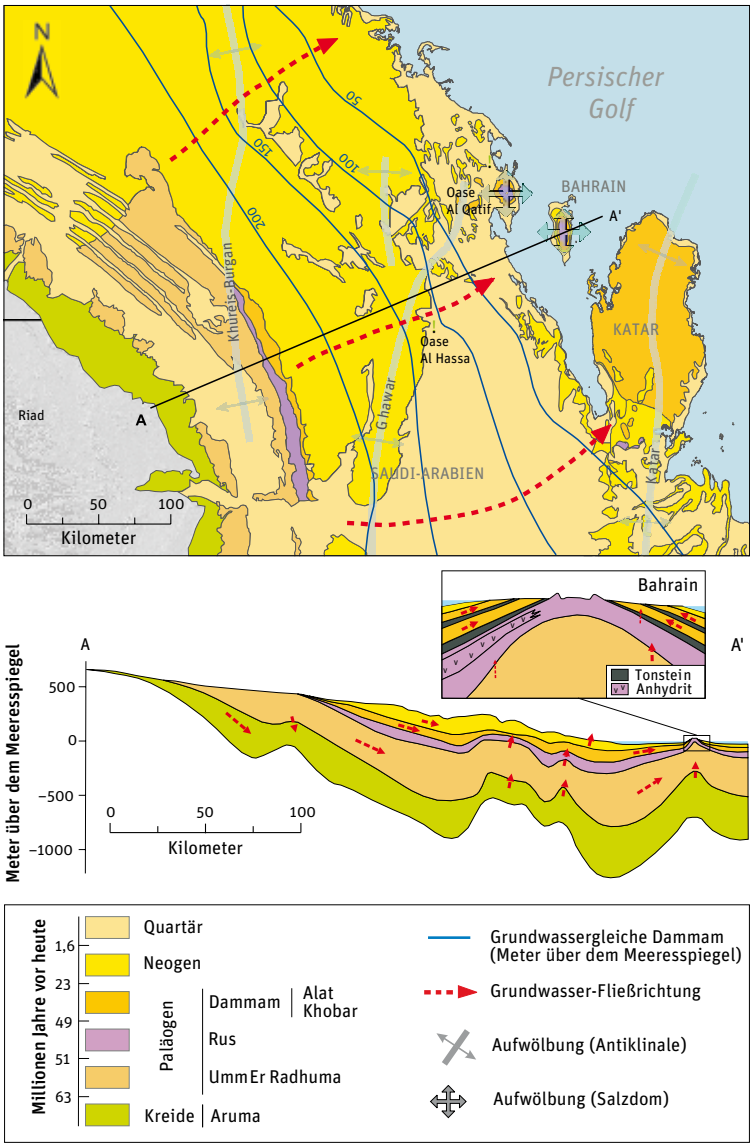
Als noch Flüsse und Seen die Arabische Halbinsel prägten

Das Aquifersystem selbst mit seinen ausgedehnten Höhlen und Klüften entstand erst vor rund 5,3 Millionen Jahren, also im Pliozän. Zu dieser Zeit hob sich die Arabische Halbinsel und wurde endgültig zu Festland. Der Persische Golf sank dagegen ab. Als Folge davon begannen in einem relativ feuchten Klima die Grundwasserleiter zu verkarsten. Bei diesem Vorgang wandelt sich sehr gering lösliches Kalziumkarbonat in das sehr gut lösliche Kalziumhydrogenkarbonat um. Je mehr Kohlendioxid – und damit Kohlensäure – das Wasser enthält, desto mehr Kalk kann es zersetzen und aufnehmen.

Außer einer Mindestmenge an Niederschlag erfordert die Verkarstung im Untergrund gewöhnlich aber auch eine Vegetationsdecke an der Oberfläche. Sickerwasser aus belebtem Boden enthält nämlich weit mehr Kohlendioxid als Regenwasser, weil die Pflanzen über ihre Wurzeln Kohlendioxid abgeben. Allerdings können auch aus der Tiefe aufsteigende Gase wie Kohlendioxid, Methan oder Schwefelwasserstoff in Verbindung mit Wasser das Kalkgestein lösen. Eine Quelle für diese Gase sind die riesigen Erdöllagerstätten, die sich unterhalb des Aquifersystems im Osten der Arabischen Halbinsel befinden. Außerdem kann sich Gips, der zusätzlich zum Kalkstein vorkommt, direkt im Wasser lösen – ohne Mitwirkung von Kohlendioxid oder anderen Stoffen. Bis zu 2,4

Wie das Wasser nach Dilmun kam

Die ehemaligen Quellen von Bahrain gehörten zu einem großen Karstaquifersystem (große Karte), das weite Teile der Arabischen Halbinsel durchzieht. Die Gesteine an der Oberfläche oder unter dem Quartär, das die anderen Schichten großenteils wie ein Teppich überdeckt, werden von Westen nach Osten immer jünger. Die Grundwassergleichen (blaue Linien) stellen die Wasserstände im Dammam-Aquifer dar, aus dem die Quellen Bahrains gespeist wurden. Das Wasser fließt auf seiner jahrtausendelangen Reise in östlicher Richtung (rote Pfeile). Im Westen tritt es in die Aquifere ein (Profilschnitt unten) und folgt dann dem Einfallen der geologischen Schichten in den Untergrund. Im Osten steigt es an Aufwölbungen der Gesteinsschichten wieder auf. Eine solche Aufwölbung ist die Insel Bahrain (Detailansicht). Hier ist der Dammam-Aquifer in den Khobar- und Alat-Aquifer zweigeteilt. Dazwischen bilden Tonsteine (dunkelgrau) eine Barriere, die nur wenig Wasser durchlässt. Sie trennen die beiden Aquifere auch von der darunterliegenden Rus-Formation (lila). Diese wirkt überall dort, wo sie aus Anhydrit besteht (mit »v« markiert), gleichfalls als Sperrschicht. An anderen Stellen besteht sie aus Kalkstein, so dass Wasser vom Umm-Er-Radhuma-Aquifer empordringen kann. Es ist allerdings salzhaltiger als das des Dammam-Aquifers. Die übermäßige Wasserentnahme auf Bahrain seit Mitte des letzten Jahrhunderts hat den Aufstieg dieser stark mineralisierten Lösungen begünstigt.



RANDOLF RAUSCH UND HEIKO DIRKS

M. QAMBER

Die Quellen von Bahrain speisten auch beliebte Bäder, die inzwischen jedoch ausgetrocknet sind. Dargestellt sind die Adari-Quelle (links) und eine Quelle auf der Insel Nabi Saleh (rechts) Mitte des letzten Jahrhunderts (oben) und nach dem Versiegen in den 1990er Jahren (unten).

Gramm pro Liter werden dabei dem Gestein entzogen. Zurück bleiben Hohlräume.

Die durchgehend feuchte Klimaperiode endete mit dem Beginn der Eiszeiten vor 1,8 Millionen Jahren. In deren Verlauf wechselten lange sehr kalte Phasen mit kurzen wärmeren ab. Auf der Arabischen Halbinsel waren die Temperatursprünge allerdings geringer als in Europa und Nordamerika. Stattdessen alternierten feuchte und trockene Perioden. Während der Feuchtphasen breitete sich die Savanne aus; in den Trockenzeiten bildeten sich Wüsten.

Grundwasser aus der Eiszeit

Dieser Klimawechsel beeinflusste auch die Verkarstung: Sie ließ bei Trockenheit nach und beschleunigte sich in Phasen mit höherem Niederschlag. Während der relativ ariden Kaltzeiten lag der Meeresspiegel weltweit zudem mehr als hundert Meter unter dem heutigen Niveau, weil viel Wasser in den Gletschern gebunden war.

Dadurch trocknete der Persische Golf – der maximal hundert Meter tief ist – mehrfach aus. Flüsse bahnten sich ihren Weg, wo sich heute Meeresgrund befindet, und auch tiefer gelegene Gesteinsschichten verkarsteten: Hohlräume entstanden, die Grundwasser aufnehmen und speichern konnten.

Da seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 8000 Jahren auf der Arabischen Halbinsel wieder ein wüstenhaftes Klima herrscht, erhält das Aquifersystem schon lange kaum noch Zufuhr durch Regen. In ihm ist deshalb fast nur mehr altes, fossiles Wasser gespeichert. Das bestätigen Untersuchungen der stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium, die auf feuchte Bedingungen zur Zeit der Grundwasserneubildung hinweisen. Radiometrische Datierungen mit Hilfe von Kohlenstoff-14 ergaben Alter zwischen 5000 und 25 000 Jahren.

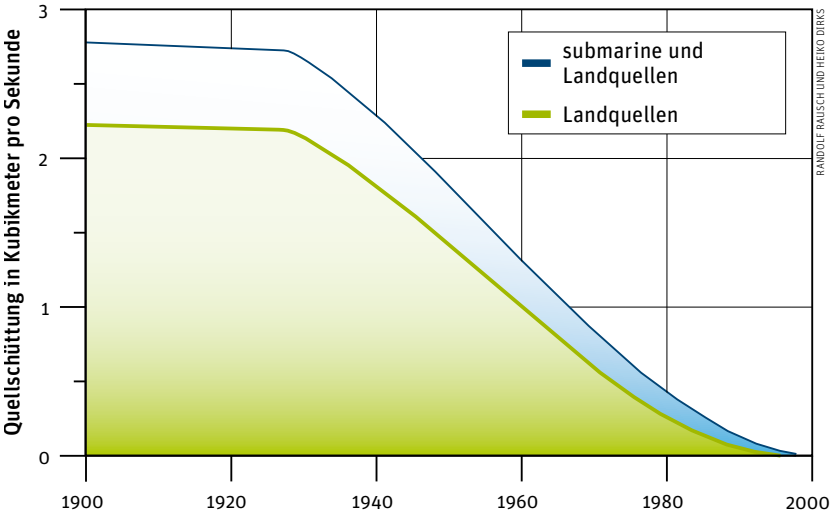
Das Wasser aus den Quellen Bahrains war also viele tausend Jahre unterwegs, bevor es wieder an die Oberfläche gelangte. Der Höhenunterschied zu dem Inneren der Arabischen Halbinsel, das 600 Meter über dem Meeresspiegel liegt, verlieh ihm genügend Druck für den Austritt in Form von artesischen Brunnen. Unterirdisch fließt das Grundwasser sehr langsam nach Osten. Dabei erreicht ein Teil direkt den Persischen Golf, während der andere in Sabkhas (flachen Wassertümpeln) oder Oasen entlang der Küste hervorquillt.

Die Strömung des Grundwassers von West nach Ost zeigt sich auch darin, dass es im Westen nur 0,6 bis 1 Gramm gelöste Feststoffe pro Liter enthält. Da es unterwegs weitere Mineralien aufnimmt, steigt deren Gehalt – oft bis auf mehr als fünf Gramm pro Liter im Bereich der Küste. Damit war und ist dieses Wasser meist weder zum Trinken noch zur Bewässerung in der Landwirtschaft geeignet. Der Mineralgehalt variiert jedoch in Abhängigkeit vom durchflossenen Gestein. Das Wasser der Quellen Bahrains enthielt deshalb nur etwa 2,5 bis 3,5 Gramm Mineralstoffe pro Liter und war damit gerade noch trinkbar.

Probleme bereitete allerdings der hohe Fluorid-Anteil. Er reichte – bei großen lokalen Schwankungen – von ungefähr 0,5 bis über 2,5 Milligramm pro Liter. Einige Quellen überschritten damit den heutigen Grenzwert der Weltgesundheitsorganisation für Fluorid im Trinkwasser, der in warmen Gebieten bei 1,5 Milligramm pro Liter liegt. Eine zu hohe Zufuhr des Minerals führt nicht nur zu einer Verfärbung der Zähne (Zahnfluorose), sondern auch zu einer Verwachsung der Knochen (Knochenfluorose/Osteosklerose). Ein Skelettfund aus der frühen Dilmun-Zeit zeigt dies sehr drastisch: Die Wirbelknochen sind teilweise zusammengewachsen und versteift, so dass die Person schwer behindert war.

Es entbehrt nicht einer gewissen Tragik, dass die Quellen von Dilmun jetzt, da Geolo-

Die Schüttung der Quellen von Bahrain hat ab 1932, als das Erdöl eine rasche wirtschaftliche Entwicklung auslöste, stetig abgenommen. Zur Wasserversorgung wurden damals viele neue Brunnen gebohrt. Seit den 1990er Jahren sind die Quellen deshalb versiegt.



RANDOLF RAUSCH UND HEIKO DIRKS

NATIONALMUSEUM BAHRAIN

Bedingt durch die stellenweise hohen Fluoridkonzentrationen im Grundwasser litten viele Bewohner von Bahrain an Zahn- und Knochenfluorose. Bei diesem Skelettfund aus der frühen Dilmun-Zeit sind deshalb die Wirbelknochen zusammengewachsen und versteift, so dass die Person schwer behindert war.

gen ihre Entstehung und Herkunft endlich geklärt haben, erschöpft sind. Der Grund ist auch von anderen Orten nur zu gut bekannt. Seit den 1930er Jahren haben Landwirte und Unternehmer sich nicht mehr mit der natürlichen Quellschüttung begnügt, sondern durch Pumpen künstlich weiteres Wasser entnommen. Der Hauptteil wurde auf die Felder geleitet, der Rest diente der Trinkwasserversorgung und industriellen Zwecken.

Versiegende Quellen

Die übermäßige Nutzung ließ den Grundwasserspiegel mehr als zehn Meter unter die Landoberfläche sinken. Außerdem drang aus der Tiefe und aus dem Meer salzigeres Wasser nach und verschlechterte die Wassergüte. Die Versalzung machte den Anbau von Nutzpflanzen schließlich unmöglich.

Seit den 1990er Jahren sind die Quellen von Bahrain versiegt und die ehemals blühenden Oasen wieder zu Wüsten geworden. Die Chance einer kostengünstigen, sicheren Trinkwasserversorgung für die Insel ist damit für immer vertan. Bahrain muss heute auf die Meerwasserentsalzung zurückgreifen. Die Anlagen liefern derzeit etwa 3,4 Kubikmeter Trinkwasser pro Sekunde. Dies ist nur geringfügig mehr als die frühere natürliche Quellschüttung. Momentan sind die Kosten kein Problem, da sie aus dem Verkauf von Erdöl und Erdgas bestritten werden können. Doch was geschieht, wenn die Vorräte an fossilen Brennstoffen zur Neige gehen? Ein Problem ist auch die mangelnde Versorgungssicherheit. Während des zweiten Golfkriegs, ausgelöst durch den Einmarsch Iraks in Kuwait (1990/91), bestand zeitweise die Gefahr, dass die Anlagen wegen der Ölverschmutzung des Golfs hätten abgeschaltet werden müssen. Nur einen Vorteil hat das entsalzte Meerwasser: Es enthält praktisch kein Fluorid.

Die Insel Bahrain wurde durch die rücksichtslosen Grundwasserentnahmen bereits trockengelegt. Auch in Saudi-Arabien, wo der Großteil des Aquifersystems liegt, sind die Quellen von Al Hassa und Al Qatif versiegt. Doch dort scheint man aus den Fehlern der Vergangenheit offenbar Lehren ziehen zu wollen. Zwar werden jährlich immer noch etwa 22 Milliarden Kubikmeter Grundwasser aus nicht erneuerbaren fossilen Reservoiren entnommen. Davon gehen 92 Prozent in die Landwirtschaft, sechs Prozent in die Trinkwasserversorgung und zwei Prozent in die Industrie. Saudi-Arabien plant aber, diesen Verbrauch innerhalb der nächsten Dekaden drastisch zu senken.

Betroffen ist vor allem die Landwirtschaft. Die Zeitung »Arab News« berichtete am 9. Januar dieses Jahres über ein geplantes Sparprogramm. Demnach will das Königreich in den nächsten acht Jahren den Getreideanbau schrittweise drosseln. Ein Regierungsbeschluss sieht vor, den Ankauf von im eigenen Land angebautem Weizen jährlich um 12,5 Prozent zu reduzieren, so dass ab 2016 kein Getreide in Saudi-Arabien mehr produziert wird. An die Stelle wasserhungriger Feldfrüchte sollen besser an Trockenheit angepasste Pflanzen treten.

Dazu kommen die Optimierung von Bewässerungstechniken und die Wiederverwendung von geklärtem Abwasser. All das soll dazu dienen, die noch vorhandenen Wasserreserven zu schonen, damit die Menschen auf lange Sicht zumindest mit Trinkwasser versorgt werden können.

Skeptiker meinen allerdings, die Maßnahmen kämen zu spät und griffen zu kurz. Die Öl- und Gasreserven auf der Arabischen Halbinsel – und das daraus zu erzielende Einkommen – reichen noch etwa dreißig bis fünfzig Jahre. Bis dahin muss die Transformation in ein von Bodenschätzen unabhängiges Wirtschaftssystem gelungen sein, soll das Land nicht in Armut zurückfallen. Wie so oft liegt die Verantwortung für die Sicherung der Zukunft in der Gegenwart. Said kann es gleichgültig sein, welche Maßnahmen ergriffen werden: Sein Leben ändern sie nicht mehr. Wohl aber das seiner Söhne und Enkel. ◁

Randolf Rausch (oben) ist Geologe und Technischer Direktor für »Grundwasserstudien arider Gebiete« bei der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit in Saudi-Arabien. **Heiko Dirks** ist Hydrogeologe und Mitarbeiter bei Dornier Consulting in Saudi-Arabien. **Katlen Trautmann** arbeitet von Deutschland aus überregional als Journalistin mit den Schwerpunkten Wissenschaft und Wirtschaft.

Bibby, G.: Looking for Dilmun. Stacey International, London 1996.

Larsen, C. E.: Life and Land Use on the Bahrain Islands: The Geoarcheology of an Ancient Society. Prehistoric Archeology and Ecology Series. The University of Chicago Press, Chicago/London 1983.

Pint, J.: The Desert Caves of Saudi Arabia. Stacey International, London 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951087.

Kunst der GEISTER

Mit eindrucksvollen Schnitzereien erinnern Künstler der zu Neuirland gehörenden Südseeinseln an Verstorbene – und bannen deren Geister in Masken, Friese und Statuen, um Unheil von den Lebenden fernzuhalten.

»Das buschige Haar ist wie ein Helm geschnitten, in der Mitte vom Nacken bis zur Stirn beladen mit einem roten Pulver wie Ziegelstaub. Das Haar ist an den Seiten fast bis zur Haut rasiert, auf der einen Seite eine dicke Schicht von gelber Farbe, auf der anderen von weißer Farbe aufgetragen, mit langen Spitzen bis zu den Augenbrauen«

Eliza Kent, 1803. Die Engländerin schilderte die Begegnung mit Einheimischen, die vorsichtig an das Segelschiff heranruderten, das auf einer Fahrt von Australien nach Indien vor Neuirland ankerte.

ALLE FARBFOTOS DES ARTIKELS: STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUSSISCHER KULTURBESITZ, ETHNOLOGISCHES MUSEUM BERLIN / MARTIN FRANKEN

Aus Holz, Schneckenhäusern, Rindenbast und Rattan schufen kunstfertige Bewohner Neuirlands diese »Totenmaske« (entdeckt 1875 von Hermann Strauch, Offizier auf dem Forschungsschiff S.M.S. Gazelle).

Von Markus Schindlbeck

Am 21. Mai 1908 trat Emil Stephan, Leiter einer Deutschen Marine-Expedition auf der Südseeinsel Neumecklenburg (heute Neuirland), seine letzte Reise an. Er war schwer an Malaria erkrankt und hoffte auf Hilfe in Namatanai, einer kolonialen Verwaltungsstation im Süden der Insel. Einheimische trugen den Fiebernden in einer Hängematte, die an ein dickes Bambusrohr gebunden war, die Küste entlang. Immer wieder versperrten Felsen den Weg, musste die Gruppe trotz der Brandung auf das zerklüftete Riff ausweichen, erschwerten mannshohes Gras und drückende Hitze den Marsch. Endlich war eine Missionsstation erreicht, und es ging schneller mit einem Ruderboot weiter. Doch alle Mühen waren umsonst, vier Tage nach ihrem Aufbruch erlag der Pionier der Neuirland-Forschung der tückischen Tropenkrankheit.

Drei Jahre zuvor war Emil Stephan als Schiffsarzt eines Vermessungsschiffs auf die Insel gekommen und hatte zahllose Märsche in ihrem Süden unternommen (von 1885 bis 1914 war sie Teil von Deutsch-Neu-Guinea). Im Jahr 1907 erschien sein Werk »Südseekunst. Beiträge zur Kunst des Bismarck-Archipels und zur Urgeschichte der Kunst überhaupt«, das erste, das sich systematisch und aus Sicht eines Wissenschaftlers mit der Kunst dieser Weltgegend auseinandersetzte.

Das Buch stieß auf reges Interesse. Im selben Jahr machte Pablo Picassos Gemälde »Les Demoiselles d'Avignon« Furore, das den Be-

In Kürze

Auf einigen Südseeinseln gehören künstlerische Tätigkeiten zum rituellen Rahmen von Toten- und Erinnerungsfeiern. Die Geister der Verstorbenen, auch der **mythischen Ahnen**, werden herbeigerufen und beleben Kunstgegenstände wie Masken oder Musikinstrumente. Eine besondere Blüte erreichte diese Ritualkunst auf Neuirland. Dort dienen vor allem große und komplexe Schnitzereien als materielle Hülle für den **Geist eines Toten**. Bis heute ist die Symbolik dieser Werke kaum verstanden.

Neuirland – eine Insel fern des Südseemythos

erste Besiedlung vor etwa 35 000 Jahren

weitere Besiedlung (Lapita-Funde) vor etwa 3600 Jahren

1616 erste dokumentierte Sichtung der Insel durch niederländische Seefahrer

1643 neuerliche Sichtung durch den Niederländer Abel Tasman und erste bildliche Darstellung der Bewohner

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Neuirland und seine Inseln sind Teil des Bismarckarchipels, das heute zu Papua-Neuguinea gehört.

Dieses gut 3,5 Meter lange Paneel aus Palmblattrippen und anderem Fasermaterial entdeckte der Ethnologe Edgar Walden während der Deutschen Marine-Expedition 1907 bis 1909 in einem Initiationshaus. Nach ihrer ersten Monatsblutung wurden Mädchen dort auf ihre Rolle als Frau und Mutter vorbereitet. Dazu dienten zum Beispiel Darstellungen der Phasen von Fruchtbarkeit und Schwangerschaft, aber auch eine regelrechte Fütterung – ein wohl genährter Körper entsprach dem Schönheitsideal.

1700 William Dampier entdeckt die von Neuguinea abseits liegende Inselwelt des Bismarckarchipels und nennt sie Neubritannien.

1767 Philip Carteret befährt die Wasserstraße zwischen Neuirland und Neubritannien. Er gibt der kleineren Insel den Namen Nova Hibernia (Neuirland).

1788 Gründung einer britischen Kolonie in New South Wales (Australien), damit Zunahme der Schiffsverkehrs zwischen Ostasien und Australien. Die Route führt an Neuirland vorbei.

1803 erster belegter Handel mit »Kuriositäten« (ethnografischen Gegenständen)

1875 Beginn der Missionsarbeit; die S.M.S. Gazelle vermisst im Auftrag der Kaiserlichen Admiralität Neuirlands Küste.

1880 Errichtung einer Handelsstation

1884 Proklamation der deutschen Kolonialherrschaft – die Insel heißt nun Neumecklenburg

1885 – 1909 Deutsche Marine-Expeditionen erforschen die Insel und die Kultur ihrer Bewohner

1914 Übergabe der deutschen Kolonie an Australien

1975 Neuirland wird Teil des unabhängigen Staats Papua-Neuguinea

»Wer sie einmal gesehen, wird wie von Fieberträumen von ihnen verfolgt. Man spürt den Druck der sengenden Tropenglut auf die Einbildungskraft ihrer Erzeuger«

Karl Woermann, Ende des 19. Jahrhunderts Direktor der Gemäldegalerie und des Kupferstichkabinetts in Dresden

Knochen als Elemente von Maskenhelmen wohnte in der Vorstellungswelt Neuirlands besondere magische Kraft inne (links, Nordneuirland, entdeckt von Edgar Walden 1907 – 1909). Auch Vögel, die Fische

jagen, gehören zu den häufigen Motiven (rechts). Vermutlich beruhten derartige Schnitzereien auf der Beobachtung einer solchen Jagd (Lavongai-Insel, gesammelt von dem Schiffsoffizier Hermann Strauch 1875).

ginn der Moderne in der Malerei markierte. Der Spanier hatte auch Eindrücke der Kunst der Südsee verarbeitet, die er allerdings nur aus den Sammlungen der Museen kannte.

Zu den schönsten Objekten dort zählten die Schnitzwerke jener großen Insel, die Missionare, Händler und Kolonialbeamte seit Mitte des 19. Jahrhunderts nach Europa brachten. Mitunter sprachen die Experten von »Tempelfiguren« und brachten damit ihren Respekt zum Ausdruck. Kunstvoll und archaisch zugleich weckten sie die Begehrlichkeit der Sammler. Zudem hatte der französische Maler Paul Gauguin (1848 – 1903) den Mythos vom Südseeparadies kreiert – obwohl seine farben- und sinnenfrohen Bilder wenig mit der kolonialen Wirklichkeit gemein hatten, die er selbst dort antraf. »Gottheiten« mit weiblichen Brüsten und übergroßen Phalli, die so genannten *uli* (siehe Kasten nächste Seite), wirkten zudem wie ein dunkles Rätsel und erweiterten das Klischee um eine interessante Fassette.

Totenklage und Leichenschmaus als Ritual

Um diese Kunst zu verstehen, beauftragte das Berliner Museum für Völkerkunde Emil Stephan 1906 mit der Leitung einer weiteren Expedition zum Bismarckarchipel, zu dem Neumecklenburg gehörte. Bald erkannten die Forscher, dass ein bestimmter Typ von Kunstwerken typisch für den Norden war und offenbar im Zusammenhang mit dem Totenkult stand. So beschrieb der Ethnologe Edgar Walden, der mit an Bord war und diesen Teil der Insel erkundete, 1908 die Rituale nach dem Ableben eines alten Mannes.

Die Dorfbewohner hatten seinen Leichnam in hockender Stellung auf einem Holzstoß aufgebahrt und den Platz, auf dem später die Schnitzereien ausgestellt werden sollten, regelrecht eingezäunt. Die Frauen erhoben die Totenklage. Der älteste Sohn hockte neben der Leiche und rief: »Vater, geh!« Dann wurde sie verbrannt. Zwei Tage später hüllten Männer die Überreste in Blätter und warfen sie ins Meer. Wo der Scheiterhaufen gewesen war, fand nun ein Festmahl statt. Die Männer und Frauen erhielten Schweinefleisch und Taro, die wichtigste Knollenpflanze in dieser Gegend. Für jeden Tag, den der Tote unbestattet geblieben war, musste ein Schwein getötet werden, was auch die Eile der Beisetzung erklärt. Aus westlicher Sicht diente diese Vorschrift freilich auch einem hygienischen Zweck: Im tropischen Klima wurde eine Leiche bald zum Seuchenrisiko.

Die Kunstwerke erfüllten damals wie heute eine existenziell wichtige Aufgabe: Sie reprä-

Geschlechtsmerkmale von Mann und Frau kennzeichnen die *uli*-Statuen aus dem mittleren Neuirland, die Bestandteil geheimer Kulte waren (etwa 1,60 Meter, Erwerb Anfang des 20. Jahrhunderts).

Die *uli*-Figuren

Sicher bist Du ein großer Gott
Ich sah Dich mit meinen Augen wie kein anderer
Dich bedeckt noch Erde und Blut wie Du sie gerade schufst
Du bist ein alter Bauer der nichts weiß
Zur Stärkung aßt Du wie ein Schwein
Mit Menschenflecken bist Du noch bedeckt
Bis zu den Ohren hast du sie in Dich reingestopft
Du hörst nicht mehr
Du schaust uns begehrlich vom Grunde einer Muschel an
Deine Schöpfung sagt hoch die Hände und du drohst noch
Du ängstigst und verzauberst.

André Breton,
im Katalog zur Ozeanien-Ausstellung
der Galerie André Olive, 1948

Im mittleren Neuirland entstand noch eine weitere Gattung der Inselkunst: die scheinbar zweigeschlechtlichen *uli*-Figuren. Mit prallen Brüsten einerseits, protzendem Penis andererseits avancierten sie zu besonderen Lieblingen der Sammler; der surrealistische Dichter André Breton (1896 – 1966) widmete ihnen das obige Gedicht. Sie dienten der Erinnerung an bedeutende Vorfahren.

Ihr weiblicher Aspekt verweist nach heutiger Kenntnis auf die nährende Funktion wichtiger Klananführer, während die männlichen Attribute kriegerische Kraft ausdrücken. Der *uli*-Kult ist den Erinnerungsfeiern weiter im Norden vergleichbar, diese Statuen wurden jedoch strenger geheim gehalten, insbesondere wurden sie Frauen und Kindern nicht gezeigt. Während der mehrere Monate andauernden Rituale bereitete man einen Kultplatz vor und errichtete Schauhäuser, in denen die Bildnisse ausgestellt wurden. *Uli*-Figuren sind aus einem deutlich härterem Holz geschnitzt als die Bildnisse aus dem Norden der Insel, deshalb eigneten sie sich auch zur mehrmaligen Verwendung.

Das Zentrum ihrer Herstellung lag im Landesinneren. Dort, in den Bergen, sei das Reich der Zauberer, der *uli*-Schnitzer und weisen Häuptlinge, überlieferte Augustin Krämer, der 1908 die Deutsche Marine-Expedition auf Neuirland zu Ende führte. Wenige Jahrzehnte später, im Zuge der sozialen Veränderungen infolge der Kolonialherrschaft, wurde diese Kunstform aufgegeben.

sentierten den Toten in symbolischer Form – und bannten so seine Seele. Denn ein unter den Lebenden umgehender Geist, so die Befürchtung, könne Unheil und Krankheiten bringen. Deshalb war und ist auch heute die Zeit nach der Bestattung für die Hinterbliebenen von Tabuvorschriften geprägt. Im Gehöft des Verstorbenen verzehren sie einige Monate nach dessen Tod die letzte Ernte aus seinem Garten. Besondere Nahrungsvorschriften gelten, um den Geist nicht zu erzürnen. Auch sexuell müssen sich die Trauernden enthalten.

Rätselhafter Symbolkode

Heute wird der Leichnam nicht verbrannt, sondern beigesetzt. Die Männer bewachen das Grab, das in einem von Mauern umgebenen Bereich liegt, die Frauen bereiten Essen für mehrere, nach Geschlechtern getrennte Trauerversammlungen vor. Dort fertigen auch die von der Familie beauftragten Künstler in den folgenden Wochen ihre kunstvollen Holz- und Flechtarbeiten. Die einzelnen Schritte dabei – bei Schnitzwerken etwa das Fällen und des Heranschaffen des Baums, das Ausarbeiten der Form – werden von Festen unterbrochen. Nie versuchen die Schnitzer ein realistisches Porträt des Verblichenen anzufertigen. Ethnologen glauben aber, dass sie gelegentlich Art und Weise des Todes andeuten. Doch bislang ist es noch keinem Europäer gelungen, einen solchen Symbolkode zu entschlüsseln.

Als Höhepunkt der Maskenschnitzerei werden Deckel von Schneckenhäusern *(Turbo petholatus)* als Augen eingesetzt; sie sind ein Merkmal der neuirländischen Kunst. Das Bildwerk erhält durch das Einsetzen ein eigenes Leben und kann nun den Geist aufnehmen. Auch die Ahnen werden herbeigerufen, sie beleben beispielsweise Musikinstrumente. War der Tote ein besonders angesehenes Mitglied der Gesellschaft, kommen zu den *malagan* genannten Toten- und Erinnerungsfeiern (ethnologisch lassen sich beide nur schwer voneinander unterscheiden) hunderte Besucher aus umliegenden Dörfern oder von benachbarten Inseln. Eine solche Feier erfordert eine lange und aufwändige Planung: Gärten müssen gerodet und neu angelegt werden, um die Nahrung zu beschaffen, man zieht Schweine auf oder erwirbt sie. Daher finden große *malagan*-Feste zu Ehren der Verstorbenen oft auch erst Monate oder Jahre nach dem Ableben statt.

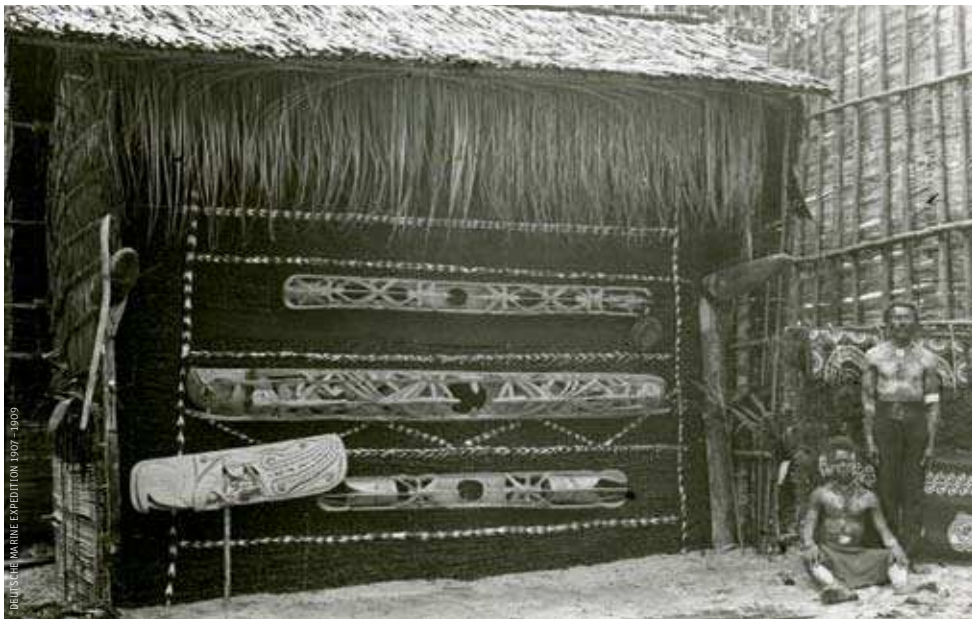
Den Höhepunkt der Feste bildet die öffentliche Enthüllung der Bildwerke. An hoch

In Zentral- und Südneuirland wurden die Schädel prominenter Anführer und Krieger etwa ein Jahr nach dem Begräbnis exhumiert, gewaschen, bemalt und für Rituale mit Wachs übermodelliert. Handelte es sich um einst angesehene Zauberer, legte man die Zeremonialschädel in große Muschelschalen, um Regen zu beschwören (Mittelneuirland, Sammlung Asmus 1920).

Neun reich dekorierte Paneele, zusammmen 1,80 Meter lang und 82 Zentimeter hoch, schmückten ein Haus für Männer, in dem Versammlungen stattfanden und Kriegsvorbereitungen getroffen wurden. Roter Ocker und Kalk, aber auch schwarzes Tuch verliehen dieser Schnitzerei aus Nordneuirland ihre dramatische Wirkung, als Augen dienten die Deckel von Schneckenhäusern.

aufgebauten Gestellen werden sie befestigt und mit grünem Blattwerk zu einer Schauhütte verkleidet (siehe Foto rechts). Vor dem Fest lagen sie hinter einem Zaun verborgen, der nun geöffnet wird. Weil die Schnitzereien nicht nur auf den jeweiligen Toten, sondern auch auf Mythen der Dorfgemeinschaft anspielen, dokumentieren sie die Ansprüche der Verstorbenen auf Landbesitz. Indem die Erben des Verstorbenen Schweine und andere Nahrungsmittel vor den Ritualobjekten darbringen, erwerben sie die Rechte an den Bildmotiven und den darin verkörperten Werten, sei es der soziale Rang, sei es Besitz.

Wie viele Werke zeitgenössischer westlicher Kunst sind auch die Neuirlands nicht für die Ewigkeit gedacht. Damit die magischen Objekte nicht in die falschen Hände geraten, wurden und werden sie mitunter zerlegt und die Teile einzeln aufbewahrt, meist aber lässt man sie einfach im angrenzenden Busch verrotten. Bis sie zerfallen sind, meiden die Lebenden diesen Ort. Insbesondere die an Sonnen erinnernden Flechtwerke, die wohl eher Spinnweben darstellen, gelten als besonders gefährlich, da sie unmittelbar neben der aufgebahrten Leiche angefertigt wurden. Diese Nähe verleiht ihnen nach dem Glauben der



In Schauhütten wurden die im Gedenken an einen Verstorbenen angefertigten Schnitzereien aufgehängt, zunächst vor den Blicken der Dorfbewohner verborgen, dann zum Erinnerungsfest, dem *malagan*, enthüllt.

Auch Figuren mit umwickeltem Körper wurden für Totenfeste im umzäunten Bereich ausgestellt. Ihr geschnitzter Kopf war nur aufgesetzt und wurde nach Abschluss der Zeremonien für eine Wiederverwendung aufbewahrt, den Körper hingegen verbrannte man (Nordneuirland, Sammlung Peekel vor 1932, 1,33 Meter hoch).

Einheimischen eine unheilvolle Kraft: Sie können krank machen, ja sogar töten.

Solche Totenfeiern oder besser Erinnerungsfeste hatten stets eine wichtige Funktion. Denn vor der Kolonisierung wurde kulturelles Wissen nur mündlich weitergegeben, die Rituale sollten dies unterstützen. Auch heute noch gehören sie zum ethnischen Inventar Neuirlands. Dabei spielen immer wieder Bezeichnungen eine große Rolle: Namen für Menschen, für Häuser und Boote, für Grundstücke oder Seegebiete. Bei Totenfesten werden sie vorgetragen, um Ansprüche anzumelden beziehungsweise um den Besitz an einem Objekt von der Gemeinschaft zeremoniell bestätigen zu lassen.

Kunst der Toten für europäische Sammler

Nur wenige der Künstler Neuirlands sind namentlich bekannt, sie arbeiten im Auftrag und werden dafür bezahlt. Die meisten sind zwar Spezialisten, leben aber vor allem von ihren Gärten und vom Fischfang. Das weiche Holz des Alstonia-Baums *(Alstonia villosa)*, verwandt mit dem Fieberbaum, erleichtert ihre filigrane Arbeit. Während Friese und Bildsäulen aus einem Stück Holz herausgearbeitet werden, sind Figuren häufig aus mehreren Teilen zusammengesetzt. Arme und Köpfe werden in den Rumpf hineingesteckt (siehe nebenstehendes Foto). Diese Technik des Verzapfens ist außer im Norden weder auf Neuirland noch sonst wo auf Neuguinea verbreitet und verweist auf kulturelle Einflüsse aus Südostasien – Neuirland liegt am nördlichen Rand des Bismarckarchipels.

Die häufigste Kunstgattung sind hölzerne Masken, es gibt aber auch säulenförmige Schnitzwerke und Friese; ein beliebtes Motiv darin sind Gesicht und Gestalt des Menschen. Die aus dem Norden der Insel stammenden Schnitzereien weisen eine Fülle weiterer Symbole auf, die jedoch nicht immer einfach zu deuten sind. Ein langer Einbaum, dessen Bug und Heck die Form eines Fisches aufweisen, stellt beispielsweise samt den darin sitzenden und stehenden Passagieren vermutlich einen Fisch dar. Andere Fische wiederum halten in ihrem aufgerissenen Maul eine menschliche Figur, die sie durch das Wasser tragen oder auch verschlingen.

Sehr häufig kommen Vögel vor. Kleinere Schnitzwerke, die man bei Tänzen als Schmuck mit den Zähnen hält, stellen Nashornvögel dar. Mit ihrem großen Schnabel und ihrem lauten Gekrächze, ähnlich dem von Krähen, scheinen sie auch eine Art Vogel für das Totenreich zu sein. Ihre Darstellung finden wir ebenfalls in anderen Kulturen von

Neuguinea, wo sie in rituellen Handlungen in Erscheinung treten. Wieder andere Schnitzereien zeigen Vögel im Kampf gegen Schlangen. Letztere verweisen vermutlich auf besondere Geisterplätze, sumpfige Orte oder andere auffällige Stellen in der Natur. Die genaue Bedeutung all dieser Motive entzieht sich aber unserer Kenntnis, wie wir auf der anderen Seite auch nicht wissen, warum manche Tiere überhaupt nicht in der Kunst vorkommen, obwohl sie im Leben der Neuirländer eine große Rolle spielen. Dazu gehört beispielsweise der Hai, für den die Fischer eigens eine besondere Technik entwickelt haben: Mit großen Rasseln locken sie das Tier, fangen es mit einer Schlinge und erschlagen es an Bord.

Zum Glück für die Nachwelt verfielen manche Neuirländer auf den Gedanken, sich der gefährlichen Kunstwerke Gewinn bringend zu entledigen. Statt sie im Busch verrotten zu lassen, wurden sie bei europäischen Reisenden und Forschern eingetauscht – gegen Tücher oder Hobeleisen, Tabak, Messer und Äxte. Daraus entwickelte sich ein regelrechter Boom, und um 1900 stapelten sich die Schnitzwerke bereits bei den Händlern.

Dafür gab es leider auch einen sehr makabren Grund: Die Europäer schleppten bis dahin unbekannte Krankheiten auf die Insel ein, daraufhin stieg die Zahl der Totenfeiern. Zudem erlitt das Sozialgefüge Neuirlands im Zuge der Kolonisierung einige Brüche, die sich auch auf die Kunst auswirkten. So verließen viele Männer ihre Dörfer, um auf Plantagen zu arbeiten – die Künstler mussten sich nach neuen Auftraggebern umsehen. Gleichzeitig erhöhten neue Werkzeuge die Produktivität: Standen den Bildhauern bislang nur Muschelklingen und Steinbeile zur Verfügung, kamen gegen Ende des 19. Jahrhunderts Eisenklingen in großen Mengen ins Land. Als Emil Stephan und Edgar Walden wenige Jahre später die Dörfer besuchten, fanden sie kaum noch Steinbeile vor. Von all diesen Veränderungen profitierten letztlich Museen und Sammler in Australien, Japan, Europa und Nordamerika.

Im Museum für Völkerkunde in Berlin entdeckte der Maler Emil Nolde die Kunstwerke. Auf der Suche nach dem Ursprünglichen bereiste er kurz vor dem Ersten Weltkrieg die Südsee. Im British Museum in London ließ sich der Bildhauer Henry Moore zu Beginn der 1920er Jahre von den Schnitzwerken Neuirlands inspirieren. Ihn begeisterten die aus dem Vollen herausgearbeiteten Formen. Weil seiner Ansicht nach das Innere verborgen bleibe und ein Betrachter um die Skulptur herumgehen müsse, um sie vollständig zu erblicken, entstehe der Eindruck des Geheimnisvollen. ◁

DEUTSCHE MARINE EXPEDITION 1907–1909

Mit überlangem Rumpf stellte die 82 Zentimeter hohe Holzfigur (rechts) wohl einen Vorfahren dar. Der Anthropologe Otto Schlaginhaufen entdeckte sie während der Marine-Expedition 1907 bis 1909 in einem Männerhaus in Südneuirland. In solchen Hütten (siehe Foto oben) wurden Beratungen abgehalten.

Markus Schindlbeck leitet das Fachreferat Ozeanien des Ethnologischen Museums in Berlin-Dahlem. Er war 2007 Kurator des Museums für die Ausstellung »Neuirland. Kunst der Südsee«, die gemeinsam mit dem Saint Louis Art Museum (US-Bundesstaat Missouri) und dem Musée du quai Branly (Paris) zusammengestellt wurde. Ein Katalog zur Ausstellung ist beim Museumsshop erhältlich.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951088.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Stammzellen, Politik und Pluralität:

Wer hat in diesem Land die Moral gepachtet?

Die Debatte um moralisch brisante Forschungen wird bei nächster Gelegenheit wieder aufflammen. Anmerkungen zur Novellierung des Stammzellimportgesetzes

Von Urban Wiesing

Der Deutsche Bundestag entschied am 12. April. Mit deutlicher Mehrheit wurde der Stichtag zum Import von embryonalen Stammzellen vom 1. Januar 2002 auf den 1. Mai 2007 verschoben. Zudem präzisierte der Gesetzgeber missverständliche Formulierungen zur Rechtslage für deutsche Wissenschaftler, die im Ausland an embryonalen Stammzellen forschen: Sie werden fortan nur bestraft, wenn sie im Inland unrechtmäßig an Stammzellen arbeiten. Damit sind die juristischen Rahmenbedingungen der embryonalen Stammzellforschung in Deutschland geklärt. Freilich: Die politische Entscheidung des Deutschen Bundestages kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass die moralischen Konflikte weiterhin bestehen bleiben. Die Debatte dürfte nur vorläufig beendet sein und bei nächster Gelegenheit wieder aufflammen. Und sie gab Auskunft über Grundhaltungen in Deutschland, die sich auch auf den Wissenschaftsstandort auswirken. Worum ging es also?

Zunächst sollte man zwei Fragen auseinanderhalten: die Frage nach der Moral und die Frage nach der Wahrscheinlichkeit von Erfolgen. So war in der Debatte immer wieder das Argument zu vernehmen, die embryonale Stammzellforschung sei überflüssig, denn sie böte keine Hoffnung auf Erfolg. Immunverträglichen Gewebeersatz zur Behandlung von Krankheiten werde diese Technologie nicht liefern. Und in der Tat brachte die Forschung an embryonalen Stammzellen bislang keine klinische Anwendung hervor. Praktischer Nutzen in der Medizin sei »vorerst nicht zu erwarten«, stellte der Nationale Ethikrat wohl zu Recht fest. Und niemand kann derzeit redlicherweise garantieren, dass sich praktischer Nutzen jemals einstellen wird. Ob sich embryonale oder adulte Stammzellen (siehe Lexikon) besser oder überhaupt eignen, wissen wir derzeit ebenfalls nicht – trotz euphorisch gefeierter Durchbrüche bei der Forschung mit adulten Stammzellen. Sollte man deswegen auf die Forschung an embryonalen Stammzellen verzichten?

Erfolg versprechend oder nicht?

Ob eine Technologie erfolgreich sein wird oder nicht, die Frage ist – wie so häufig in der Wissenschaft – nur durch Forschung zu beantworten. Ungewissheit ist echter Forschung nun mal eigen und sie wird nicht von selbst verschwinden, sondern allenfalls durch Forschung überwunden. Das ist nicht der Ausnahme-, sondern der Normalzustand echter Forschung. Also ist es sinnlos, immer wieder – am besten vor laufender Kamera – ungeniert zu behaupten, die Forschung an embryonalen Stammzellen sei im höchsten Maß Erfolg versprechend

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

DAS STAMMZELL-GESETZ

heißt vollständig Gesetz zur Sicherstellung des Embryonenschutzes im Zusammenhang mit Einfuhr und Verwendung menschlicher embryonaler Stammzellen (Stammzellgesetz), kurz StZG, und wurde am 28. Juni 2002 beschlossen, am 12. April 2008 novelliert.

oder vollends zum Scheitern verurteilt. Stattdessen stellt sich die Frage, wie man auf die unvermeidliche Ungewissheit antworten soll – defensiv oder offensiv? Das zentrale moralische Argument gegen eine offensive Antwort, gegen die Forschung an embryonalen Stammzellen, war – und ist – der Schutz des ungeborenen Lebens, werden dabei doch Embryonen »verbraucht«. Daran entzündete sich die Debatte, die neben den üblichen Parteigrenzen und zuweilen auch neben den Kirchengrenzen verlief.

Das war schon 2002 so, und neue ethische Argumente sind seither auch nicht bekannt geworden. Das Stammzellgesetz von 2002 – und die Novellierung des Gesetzes hat den Wortlaut belassen – bringt im Paragraf 1 die Konfliktlage auf den Punkt: Das Gesetz sei bestrebt, »die Menschenwürde und das Recht auf Leben zu achten und zu schützen und die Freiheit der Forschung zu gewährleisten«. Das Gesetz formuliert bereits einen Kompromiss: Der Import von embryonalen Stammzellen ist »verboten«, das Embryonenschutzgesetz verbietet überdies die inländische Produktion. Nur »ausnahmsweise« für »hochrangige Forschungsziele«, die »sich voraussichtlich nur mit embryonalen Stammzellen erreichen« lassen, ist der Import von Stammzellen aus überzähligen Embryonen erlaubt, die nicht eigens zur Forschung hergestellt wurden. Die Stammzellen sollen vor dem alten und jetzt vor dem neuen Stichtag gewonnen worden sein. Damit sollte ein Anreiz für die Herstellung von Embryonen zu Forschungszwecken auch im Ausland unterbunden werden – ein wichtiges Argument für den damaligen und heutigen Kompromiss.

Der Bundestag hat mit seinem Entschluss vom 12. April im Grunde den Kompromiss von 2002 neueren Bedingungen angepasst. Doch es zeigte sich, dass der Kompromiss von 2002 schon damals für einige inakzeptabel war. Denn man darf nicht vergessen: Im Bundestag reichten die Vorschläge von einem absoluten Verbot des Imports, einer Beibehaltung des Stichtags, einer einmaligen Verschiebung des Stichtags bis hin zu dessen Aufhebung zu Gunsten einer Einzelfallprüfung. Einige Abgeordnete wollten den damaligen Kompromiss rückgängig machen, durch ein komplettes Verbot oder durch Aufhebung des Verbots. Neben einer Neugestaltung des alten Kompromisses waren auch kompromissfreie Regelungen im Gespräch.

Der moralische Konflikt

Versuchen wir, die »kompromissfreien« Standpunkte aus ihrer jeweiligen Perspektive zu verstehen, dann wird der zu Grunde liegende, eigentliche Konflikt deutlich: Die Vertreter eines restriktiven Standpunkts, sie seien hier

LEXIKON

Stammzellen sind Körperzellen, die sich in verschiedene Gewebe oder Zelltypen ausdifferenzieren können. Auch Pflanzen besitzen Stammzellen an den Spitzen von Wurzeln und Sprossen.

Embryonale Stammzellen sind in der individuellen Entwicklung die frühesten Stammzellen. Aus pluripotenten (»zu vielem mächtig«) Stammzellen können sich, im Gegensatz zu den totipotenten (»zu allem mächtig«) Stammzellen, alle Zelltypen eines Organismus entwickeln, jedoch kein ganzer Organismus.

Adulte Stammzellen sind auch nach der Geburt im Körper vorhanden, etwa in der Nabelschnur, im Knochenmark, in der Haut, in der Leber oder im Gehirn. Aus ihnen entstehen während der ganzen Lebensdauer eines Organismus neue, spezialisierte Zellen.

Induzierte Pluripotente Stammzellen: Forscher konnten aus Körperzellen künstlich pluripotente Stammzellen erzeugen, die induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS).

Stammzelllinien: Damit embryonale Stammzellen in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, werden aus Stammzellen, die sich immer wieder teilen können, Zelllinien entwickelt. In der Regel kann eine solche Linie über mehrere Jahre immer wieder geteilt werden. Die Fähigkeit zur Pluripotenz kann dabei aber auch verloren gehen. Der – umstrittene – Hauptkritikpunkt der Forscher war diesmal die Verunreinigung mit tierischen Materialien.

DIE RECHTSLAGE (AUSWAHL)

CHINA verbietet reproduktives Klonen, erlaubt aber therapeutisches Klonen unter Auflagen.

FRANKREICH erlaubt Forschung an überzähligen menschlichen Embryonen und die Gewinnung von humanen embyonalen Stammzellen.

ITALIEN verbietet die Herstellung von Stammzelllinien, ihre Einfuhr ist aber nicht ausdrücklich untersagt.

GROSSBRITANNIEN erlaubt Forschung an Embryonen als auch ihre Erzeugung durch therapeutisches Klonen.

JAPAN erlaubt Forschung an überzähligen Embryonen sowie, neben Korea und USA, das Klonen menschlicher Embryos zu medizinischen Zwecken.

SCHWEDEN erlaubt Forschung an humanen embryonalen Stammzellen aus überzähligen Embryonen, auch die Herstellung von Embryonen zu Forschungszwecken.

Die **SCHWEIZ** erlaubt es unter Auflagen, Stammzellen aus überzähligen Embryonen bis zum siebten Tag ihrer Entwicklung zu gewinnen.

SPANIEN erlaubt, aus überzähligen Embryonen Stammzellen zu gewinnen.

USA erlaubt in einzelnen Bundesstaaten (wie Kalifornien) das Klonen menschlicher Stammzellen zu Forschungszwecken, jedoch ohne staatliche Unterstützung.

Quelle: http://php.arte-tv.com/thema-futur/

die Gruppe der »Lebensschützer« genannt, berufen sich auf den vollen moralischen Status eines Embryos, den uneingeschränkten Schutz menschlichen Lebens von seinem biologischen Beginn an. Dies sei schlicht das von der Verfassung vorgegebene Recht, und die Würde sei »einer Abwägung … nicht zugänglich« (Antrag Bundestag 16/7983). Deswegen dürfe man Embryonen nicht für Forschung »verbrauchen«. Dieser Gruppe geht es um die Verteidigung eines fundamentalen Werts unserer Gesellschaft, der nicht verhandelbar ist. Der moralische Status des frühen Embryos ist kein partikulares Problem einer Wertegemeinschaft, beispielsweise einer Kirche, sondern eine Wertannahme, auf die auch eine pluralistische Gesellschaft nicht verzichten kann. In dieser Frage darf Pluralität nicht erlaubt sein, weil sonst das Fundament unserer Ordnung, die unveräußerliche Menschenwürde und der Lebensschutz zur Disposition stehen. Deshalb war der Kompromiss von 2002 schon ein fragwürdiger, und jede Verschiebung des Stichtags macht ihn noch fragwürdiger. Die Lebensschützer können nicht nachgeben, weil eben gerade die Unverhandelbarkeit des Lebensschutzes als große Errungenschaft der Menschenwürde und -rechte gilt. Konsequenz ist hier von der Sache her gefordert, sonst gibt man sie auf.

Abgestufter Lebensschutz

Nun zum anderen kompromissfreien Antrag: Die Vertreter einer liberalen Richtung gehen davon aus, dass man einen umfassenden Schutz des Embryos in der frühen Phase seiner Entwicklung in einem pluralen, säkularen Rechtsstaat nicht allgemein verbindlich begründen kann, auch nicht mit unserem Grundgesetz. Auch wenn kaum jemand in der politischen Debatte eine befruchtete menschliche Eizelle für gänzlich wertlos hält, so gibt es eine Vielzahl von Philosophen und einige Verfassungsjuristen, die nur einen abgestuften Lebensschutz des Embryos in seiner Frühphase für begründbar halten. Die zahlreichen Argumente für einen uneingeschränkten Schutz ab der Verschmelzung von Samen- und Eizelle sind ihnen nicht überzeugend. Damit steht aber nicht nur das Stammzellimportgesetz auf dem Prüfstand, sondern – und zwar viel wichtiger – das Embryonenschutzgesetz.

Aus liberaler Perspektive ergeben sich weitere Argumente gegen eine restriktive Regelung. Aus dieser Sicht haben einzelne Wertegemeinschaften oder Kirchen einmal mehr ihre Zuständigkeit überschritten, indem sie sich anmaßten, nicht nur für ihre Glaubensgemeinschaft, sondern für die ganze Gesellschaft zu sprechen. Überdies wird, so der liberale Standpunkt, auch das revidierte Stammzellimportgesetz vom Lauf der Geschichte schnellstens überholt sein. Denn sobald die Stammzellen erneut veraltet sind, werde der Stichtag vermutlich abermals verschoben. Und sobald etwas Nützliches aus der Stammzellforschung hervorgeht, werde auch Deutschland nicht darauf verzichten, genau dieses zu nutzen, schon gar nicht, wenn es um Leistungen für die Gesundheit geht. Aus wissenschaftshistorischer Perspektive sei die Debatte demnach ein Ausdruck verantwortungsloser deutscher Scheinheiligkeit in der Entwicklung und Nutzung neuer Technologien. Man fühlt sich entlastet, weiß das frevelhafte Tun im Ausland aufgehoben, und wird gleichwohl die Früchte vom Baum des Bösen genießen, sollte es sie je einmal geben – alles nach dem Motto: Wasch mich, aber mach mich nicht nass.

Betrachtet man die konträren Positionen, so sollte jeder Diskussionsteilnehmer zumindest eines anerkennen: Man kann in der Frage, welchen Schutz Embryonen genießen, mit guten Argumenten unterschiedlicher Meinung sein. Nicht im biologischen Sinn, denn nach allem, was die Wissenschaft uns mitteilt, ist mit der Verschmelzung der beiden Chromosomensätze vor der ersten Teilung oder nach den ersten Teilungen bereits ein neues menschliches Wesen entstanden. Wohl aber sind in moralischer Hinsicht geteilte Haltungen möglich: Denn es ist keineswegs klar, wie schützenswert menschliches Leben zu diesem Zeitpunkt ist. Dass aus der Biologie genau dieses nicht folgt, ja gar nicht folgen kann, ist unbestritten.

Es bedarf weiterer Zusatzannahmen, um das Schutzniveau eines Embryos festzulegen, und die sind umstritten. Es ist eben nicht zwingend, am biologischen Faktum der Verschmelzung von Samen und Eizelle eine moralische Grenze zu ziehen. Selbst wenn man sich auf das Konzept der Menschenwürde unserer Verfassung einigt, ergeben sich zwangsläufig mehrere Fragen, die geklärt werden müssen, will man die Gruppe derer bestimmen, denen der Schutz der Menschenwürde zukommt. Diese Klärung erfordert Zusatzannahmen, die ein solches Konzept von sich aus gar nicht liefern kann. Es sind die so genannten SKIP-Argumente, also Speziesargumente, Kontinuitäts-, Identitäts- und Potenzialitätsargumente, an denen sich der philosophische Streit entzündet hat, ob auch befruchtete Eizellen den vollen Lebensschutz genießen. Sind sie allein schon deswegen in höchstem Maß schützenswert, weil das Lebewesen zur Spezies Mensch gehört? Oder weil es sich um eine kontinuierliche Entwicklung vom Embryo bis zum Erwachsenen handelt? Oder weil das Le-

bewesen mit dem späteren Menschen identisch ist? Oder weil es die Potenzialität zu einem erwachsenen Menschen besitzt? Diese Fragen haben zu einer umfangreichen Diskussion innerhalb der Philosophie und des Rechts geführt. Ernüchternd, aber nicht unerwartet ist ihr Ergebnis: Die Antworten fallen ganz unterschiedlich aus und bleiben notorisch umstritten. Eine Einigkeit wurde nicht erzielt.

Wenn man also mit guten Gründen unterschiedlicher Meinung sein kann, dann läuft das Kernproblem der Stammzelldebatte auf Folgendes hinaus: Darf ein Staat beim moralischen Status von frühen Embryonen unterschiedliche Meinungen akzeptieren oder nicht, wie es die konsequenten Lebensschützer beanspruchen? Vor einer Antwort auf diese Frage muss man darauf hinweisen, dass der Staat längst einen abgestuften Lebensschutz praktiziert. Und damit sei die These untermauert: Die Stammzelldebatte war ein Stellvertreterkrieg.

Es geht nicht darum, Embryonen effektiver zu schützen. In anderen Bereichen werden sie bekanntlich viel häufiger am Weiterleben gehindert

Der Stellvertreterkrieg

Denn es ging nicht darum, Embryonen effektiv zu schützen. Bekanntermaßen werden die in anderen Bereichen viel häufiger am Weiterleben gehindert. Wer ernsthaft Embryonen in quantitativ bedeutsamem Ausmaß schützen wollte, hätte auf anderen Gebieten viel mehr zu tun als bei den 20 bewilligten Anträgen zur embryonalen Stammzellforschung von 2002 bis Anfang 2007. In deutschen Laboren lagern mehrere zehntausend befruchtete Eizellen im Vorkernstadium, weil sie nach dem Wortlaut nicht unter das Embryonenschutzgesetz fallen, und es ist unklar, was mit ihnen geschieht. Wenn die Lebensschützer wirklich Embryonen schützen wollten, dann müssten sie sich zudem der Spirale, einigen Formen der Minipille sowie der »Pille danach« zuwenden. Denn diese Maßnahmen hindern Embryonen millionenfach daran, sich weiterzuentwickeln. Dies geschieht im Übrigen ohne zwingenden Grund mit Teilfinanzierung der Krankenkassen, denn es gibt Verhütungsmittel, die *nicht* die Implantation bereits befruchteter Eizellen verhindern. Hier ließe sich, wenn es jemand ernst meinte, viel mehr für den Schutz der Embryonen tun als im Kampf um Stammzelllinien. Und wer den Wald schützen will, sollte sich um den Wald kümmern und nicht nur um einen einzelnen Ast. Sonst wird er unglaubwürdig.

In diesen Stellvertreterkriegen geht es in der Regel auch nicht um das, worum gekämpft wird, also um quantitativ effektiven Embryonenschutz. Aber worum geht es dann? In der Stammzelldebatte standen auch die Grenzen der Pluralität in unserem Staat und die poli-

EIN STARKER JAHRGANG ...

... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Zum Einsatz von Stammzellen in der medizinischen Therapie lesen Sie das Interview mit Anthony Ho auf S. 53

Urban Wiesing, Jahrgang 1958, studierte Medizin, Philosophie, Soziologie und Geschichte der Medizin in Münster und Berlin, promovierte 1987 in Medizin, habilitierte 1993 und promovierte 1995 zum Dr. phil. Seit 1998 hält er an der Universität Tübingen den Lehrstuhl für Ethik in der Medizin. Wiesing ist Direktor des dortigen Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin und außerdem seit 2004 Vorsitzender der Zentralen Ethikkommission bei der Bundesärztekammer. Für »Spektrum der Wissenschaft« schrieb er zuletzt über die Londoner Medikamentenversuche (Mai 2007, S. 102).

Eine interaktive Weltkarte mit Regelungen zu embryonalen Stammzellen: http://php.arte-tv.com/thema-futur/

Nationaler Ethikrat: Zur Frage einer Änderung des Stammzellgesetzes, Juli 2007: http://www.ethikrat.org/stellungnahmen/pdf/Stn_Stammzellgesetz.pdf

Nationaler Ethikrat: Stellungnahme zum Import menschlicher embryonaler Stammzellen, Dezember 2001: http://www.ethikrat.org/stellungnahmen/stammzellen.html

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951089.

tische Verbindlichkeit bestimmter Vorstellungen zur Diskussion. Es ging um eine interpretatorische Vormachtstellung, um die Deutungshoheit in der Selbstanschauung des Menschen, um Verbindlichkeit im Selbstverständnis des Menschen. Es ging um die Macht, eine ganz bestimmte Interpretation des Menschen als allgemein verbindlich vorzuschreiben und andere als falsch zu diskreditieren. Der Mensch darf sich beim Lebensschutz von Embryonen nur in dieser Weise interpretieren. Das wollten die Protagonisten der Lebensschützer. Die zahlreichen Argumente der Philosophie und einiger Verfassungsrechtler, nach denen man der befruchteten Eizelle in einer säkularen, liberalen Demokratie nicht den moralischen Status eines Erwachsenen zuschreiben kann, sollten politisch zur Irrlehre erklärt werden. Ein ganzer Strang der Philosophie und der Rechtswissenschaften sollte politisch inakzeptabel werden. Nur eines dürfe man in dieser Frage vom Menschen denken, und eben nicht Vielfältiges.

Denn sobald die Lebensschützer zugeben, man könnte beim Embryonenschutz mit guten Argumenten auch anderer Meinung sein, müssten sie ihre Meinung als eine Partikularmeinung unter anderen ansehen. Ein säkularer Staat, der zu diesem Streit eine übergeordnete Position einnehmen sollte, müsste eigentlich argumentieren, dass man die Überzeugungen bestimmter Wertegemeinschaften, etwa der katholischen Kirche, eben nicht für alle Mitglieder unserer Gesellschaft verbindlich machen kann, sondern allenfalls für Mitglieder dieser Wertegemeinschaften. Und sofern keine anderen Gründe für ein Verbot der Embryonenforschung sprechen, müsste der Staat einer Liberalisierung zustimmen. Damit stünde aber das Embryonenschutzgesetz auf dem Prüfstand. Der Staat könnte die Embryonenforschung nur dann verbieten, wenn sie die Grundlage des zivilisierten Zusammenlebens zerstören würde.

Grenzen der Pluralität

Damit sind wir bei der Kernfrage angelangt: Wo endet die Pluralität unserer Gesellschaft – beim Embryonenschutz? Müssen wir einen absoluten Embryonenschutz zu den unverzichtbaren Grundlagen einer menschenrechtsbasierten Demokratie zählen? Oder rechnen wir ihn zu den partikularen Überzeugungen einzelner Bürger oder Wertegemeinschaften, die nicht für alle verbindlich sind? Müssen zivilisierte Gesellschaften einen uneingeschränkten und unverhandelbaren Lebensschutzes früher Embryonen annehmen und Pluralität in dieser Frage unterbinden, weil sie sonst ihre moralische Basis zerstören würden?

Die Antwort ist einfach: Nein, müssen sie nicht! Erstens tun sie es faktisch nicht: Ich habe bereits auf die weit verbreitete Spirale und manche Formen der Minipille verwiesen. Zweitens haben Philosophen, die nur einen gestuften Lebensschutz für begründbar halten, wahrlich nicht vor, unser Grundgesetz, die Menschenwürde und -rechte und damit die Grundlagen zivilisierten Zusammenlebens abzuschaffen. Und drittens müssten wir ansonsten einige Länder – wie Israel, Großbritannien oder Spanien – aus der Gruppe zivilisierter Nationen streichen. Zu behaupten, andere Meinungen beim Embryonenschutz als die der Lebensschützer seien unvereinbar mit einem Staatswesen, das die unveräußerliche Menschenwürde und die Menschenrechte zu ihrer Basis erklärt, ist doch hochmütig gegenüber anderen Staaten. Soll man solche Staaten wirklich aus dem Kreis der zivilisierten Nationen ausschließen, nur weil sie mit gleichfalls guten Gründen und innerer Überzeugung Embryonenforschung erlauben?

Insofern – um auf Deutschland zurückzukommen – sprachen allein die Pluralitätserwägungen nicht gegen eine Anpassung des Kompromisses an die neuen Gegebenheiten oder gar eine Abschaffung der Stichtagsregelung zu Gunsten einer Einzelfallprüfung. Eine Verschiebung des Stichtags oder eine Aufhebung mit Einzelfallprüfung widersprechen jedenfalls nicht unverzichtbaren moralischen Grundsätzen zivilisierten Zusammenlebens.

Stellvertreterkriege sind in der Regel für die Sache, um die doch angeblich gekämpft wird, weit gehend irrelevant. Das gilt – leider – auch für die deutsche Stammzelldebatte. Es mag ernüchternd klingen, aber die Entscheidung des Bundestags dürfte langfristig allenfalls als Fußnote in die Geschichte der Stammzellforschung eingehen. Sie wird international weitergehen, egal, welche Regelung in Deutschland gilt, und die Deutschen werden, sobald Resultate und Therapien vorliegen, alles Hilfreiche schleunigst nutzen.

Der Bundestag hat im April einen politischen Kompromiss gefunden, in dem er den alten Kompromiss neuen Bedingungen angepasst hat. Die zu Grunde liegende Frage nach den Grenzen der Pluralität in unserem Gemeinwesen stand nicht auf der Tagesordnung. Doch genau diese Problematik wird bei nächster Gelegenheit wieder zu einer Debatte führen, auch wenn es um moralisch brisante Forschungen geht. Der Umgang mit unterschiedlichen Wertüberzeugungen berührt damit auch den Wissenschaftsstandort Deutschland. Und wir dürfen nicht damit rechnen, dass sich die Frage nach den Grenzen der Pluralität von selbst erledigen wird. ◁

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EINE SONDERPUBLIKATION VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND VDI-NACHRICHTEN ››››

Superschnelles »Gedächtnis«

»Die IBM hat die Entwicklung eines neuen, superschnellen Gedächtnisses [sic] für Rechenautomaten bekanntgegeben. Es handelt sich um äusserst kleine, gedruckte Stromkreise aus einer speziellen Metallegierung, welche in einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt gehalten werden. Ihre Verwendung basiert auf Supra-Leitung, der Eigenschaft, dass diese Metalle bei derartigen Temperaturen einem elektrischen Strom keinen messbaren Widerstand bieten. Selbst wenn die Stromquelle entfernt wird, fliesst der Strom in einem solchen Kreis jahrelang weiter. Aus diesen Elementen aufgebaute Speichereinheiten … werden in zukünftigen Rechenanlagen vielleicht eine grosse Rolle spielen.« *Neuheiten und Erfindungen, 25. Jg., Nr. 280, S. 111, 1958*

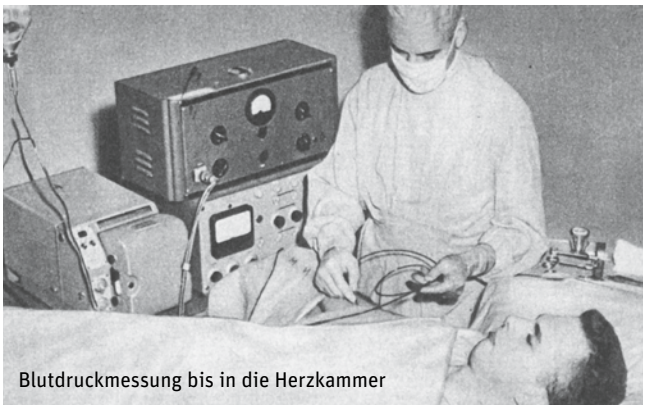
Der erste Hund im All

»Ende April veröffentlichte die PRAVDA eine Reihe von Ergebnissen der mit Hilfe der beiden sowjetischen Erdsatelliten Sputnik I und Sputnik II angestellten wissenschaftlichen Untersuchungen. … Von besonderem Interesse sind die Erkenntnisse, die durch den mitgeführten Hund ›Laika‹ gewonnen wurden: Die Startphase des Raketenaggregats überstand das Tier ohne nachteilige Folgen. Sofort nach dem Start zeigte die Herzfrequenz nahezu eine Verdreifachung. Das EKG ließ keine pathologischen Symptome erkennen. … Über die Wirkungen der kosmischen Strahlung auf das Versuchstier konnte kein definitives Ergebnis erzielt werden.« *Die Umschau, 58. Jg., Heft 11, S. 341, 1. Juni 1958*

Blutdruckmessung in Venen

1958

»Mit Hilfe eines winzig kleinen Gerätes … können die Ärzte jetzt auch innerhalb der Venen Blutdruckmessungen vornehmen. Herbert O. Sieker befestigt bei seinen Versuchen das kleine Instrument am Ende eines Plastikdrahtes und führt es in die Vene ein. Von dort aus kann man vorsichtig in die Herzkammer und Blutgefäße der Lungen vorstoßen. Das Gerät nimmt die geringsten Veränderungen des Blutdruckes wahr und leitet sie als elektrische Impulse an einen Verstärker und einen Registrierapparat weiter.« *Populäre Mechanik, 3. Jg., Bd. 6, Heft 6, S. 9, Juni 1958*



Blutdruckmessung bis in die Herzkammer

1908

Die Fotografie der Stimme

»Ein interessanter Apparat ist von der Pariser Akademie der Wissenschaften vorgelegt worden, … mit dem es Dr. Marage gelungen ist, die Vibrationen der Stimme festzuhalten. Die Erfindung ermöglicht es, Aufnahmen der Schallwellen bis zu einer Länge von über 20 Metern herzustellen; die Photographien geben ein scharfes Bild der Stimmwellen und ermöglichen es, Fehler in der Stimmbildung zu erkennen. Sowohl für die Wissenschaft als auch für die Praxis der Gesangs- und Sprachlehrer ist damit ein unschätzbares Hilfsmittel gewonnen.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik, 29. Jg., Nr. 2, S. 139, 1. Juni 1908*

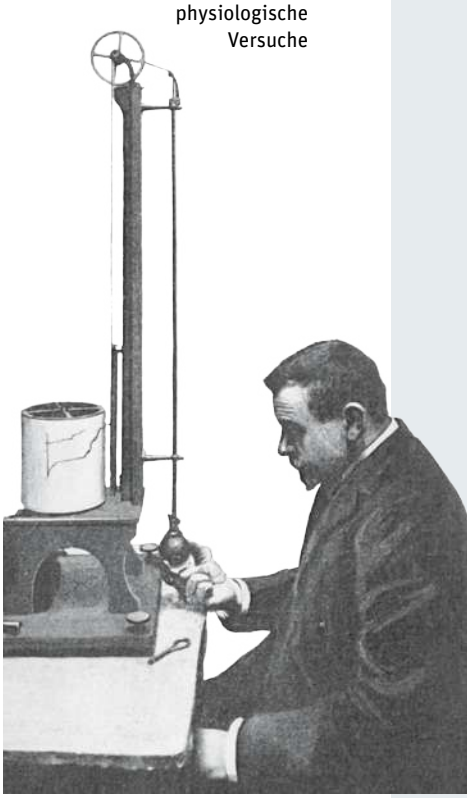
Brille gegen Seekrankheit?

»Man könnte zur Seekrankheit disponierte Menschen Prismenbrillen tragen lassen oder geeignete Zylindergläser, und beim ersten Anzeichen der herannahenden Seekrankheit Drehungen der Zylinder, entsprechend den Schiffsbewegungen, ausführen lassen. Wenn einer die notwendige Geduld und die dazu nötige Findigkeit besitzt, so wäre denkbar, dass er dadurch mit der Zeit die Rollbewegungen des Schiffes neutralisieren lernen könnte – vorausgesetzt, dass er nicht vorher seekrank wird.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik, 29. Jg., Nr. 2, S. 148, 1. Juni 1908*

Ein neuer Kraftmesser

»Charles Henry … hat die Wirkung verschiedener Diätformen auf den Kräftezustand des menschlichen Organismus untersucht. … Die Hauptschwierigkeit bei diesen Versuchen bildete nun die Konstruktion eines geeigneten Kraftmessers … Der abgebildete Apparat besteht aus einem kugelförmigen Gummiball … Dieser Ball ist mit Quecksilber gefüllt, das unter dem Druck der Hand in dem Metallrohr auf verschiedene Höhe ansteigt. Eine von dem Quecksilber angehobene Eisenmasse teilt ihre Bewegung einer Zeichenfeder mit, die auf dem Registrierzylinder die Drucke aufschreibt. Durch den Druck auf den Ball leistet das Individuum in jedem Augenblick die höchste Kraftanstrengung, deren es fähig ist.« *Die Umschau, 12. Jg., Nr. 25, S. 487, 20. Juni 1908*

Henrys Messapparatur für physiologische Versuche



KRAFTWERKE
im Nanoreich

Milliardstel Meter große Generatoren könnten Nanosysteme kontinuierlich mit Strom versorgen, indem sie Energie aus ihrer Umgebung gewinnen, sei es aus Schallwellen, den Vibrationen einer Straße oder dem Strömen des Bluts im Körper. Damit würden neuartige Biosensoren und Nanoroboter für lange Zeit autark.

Von Zhong Lin Wang

Der Uhrmacher, der in den 1920er Jahren die erste automatische Armbanduhr baute, hatte eine großartige Idee: Er »erntete« die zum Aufziehen der Feder nötige mechanische Energie aus den Armbewegungen des Trägers der Uhr. Die Faszination dieses Verfahrens wirkt heute noch fort. Mittlerweile haben wir begonnen, Nanogeneratoren zu entwickeln: extrem kleine Geräte in der Größenordnung von milliardstel Metern, die ebenfalls Energie aus ihrer Umwelt beziehen, sie in elektrische Energie umwandeln und damit winzige Nanomaschinen versorgen.

Sie könnten sich als äußerst nützlich für den kabel- und batterielosen Betrieb vielfältiger Nanosysteme erweisen. Beispielsweise sind nun implantierbare Biosensoren denkbar, die kontinuierlich den Blutzuckerspiegel von Patienten überprüfen, oder autarke Spannungssensoren, die Bauwerke wie zum Beispiel Brücken überwachen. Auch Sensoren für Umweltgifte könnten künftig ohne Batterien auskommen. Das Einsatzfeld solcher Geräte ist riesig. Zukünftige Nanoroboter, mikroelektromechanische Systeme (MEMS), Überwachungsanlagen für öffentliche Räume und natürlich tragbare elektronische Geräte – sie alle sind auf Autarkie bei der Energieversorgung angewiesen. Wahrscheinlich würden die winzigen Generatoren auch völlig neue Perspektiven eröffnen, über die wir heute nicht einmal nachdenken.

Zur Energieerzeugung auf einer Miniaturskala führen verschiedene Wege. Wissenschaftler versuchen unter anderem, Energie aus Vibrationen oder Bewegungen zu gewinnen, die vom Verkehr auf einer Straße herrühren. Auch mit Temperaturdifferenzen lässt sich arbeiten, wenn man beispielsweise die Tatsache ausnutzt, dass die Bodentemperatur einige Meter unter der Erdoberfläche recht konstant ist. Als Energiequellen werden mittlerweile selbst biochemische Prozesse, von außen eingestrahlter Ultraschall oder hörbare Schallwellen untersucht.

Nanosysteme wären ideale Abnehmer dieser Energie, denn ihr Leistungsbedarf liegt im Bereich von gerade einmal einigen Nanowatt bis Mikrowatt (milliardstel bis millionstel Watt) – so viel könnten Nanogeneratoren leisten. Man denke nur an die möglichen Energiequellen im menschlichen Körper: mechanische Energie, Wärmeenergie, die hydraulische Energie des Kreislaufs oder chemische Energie in Form von Glukose. Umgewandelt in elektrische Energie, würde bereits ein Bruchteil davon ausreichen, um verschiedenste winzige Geräte zu versorgen.

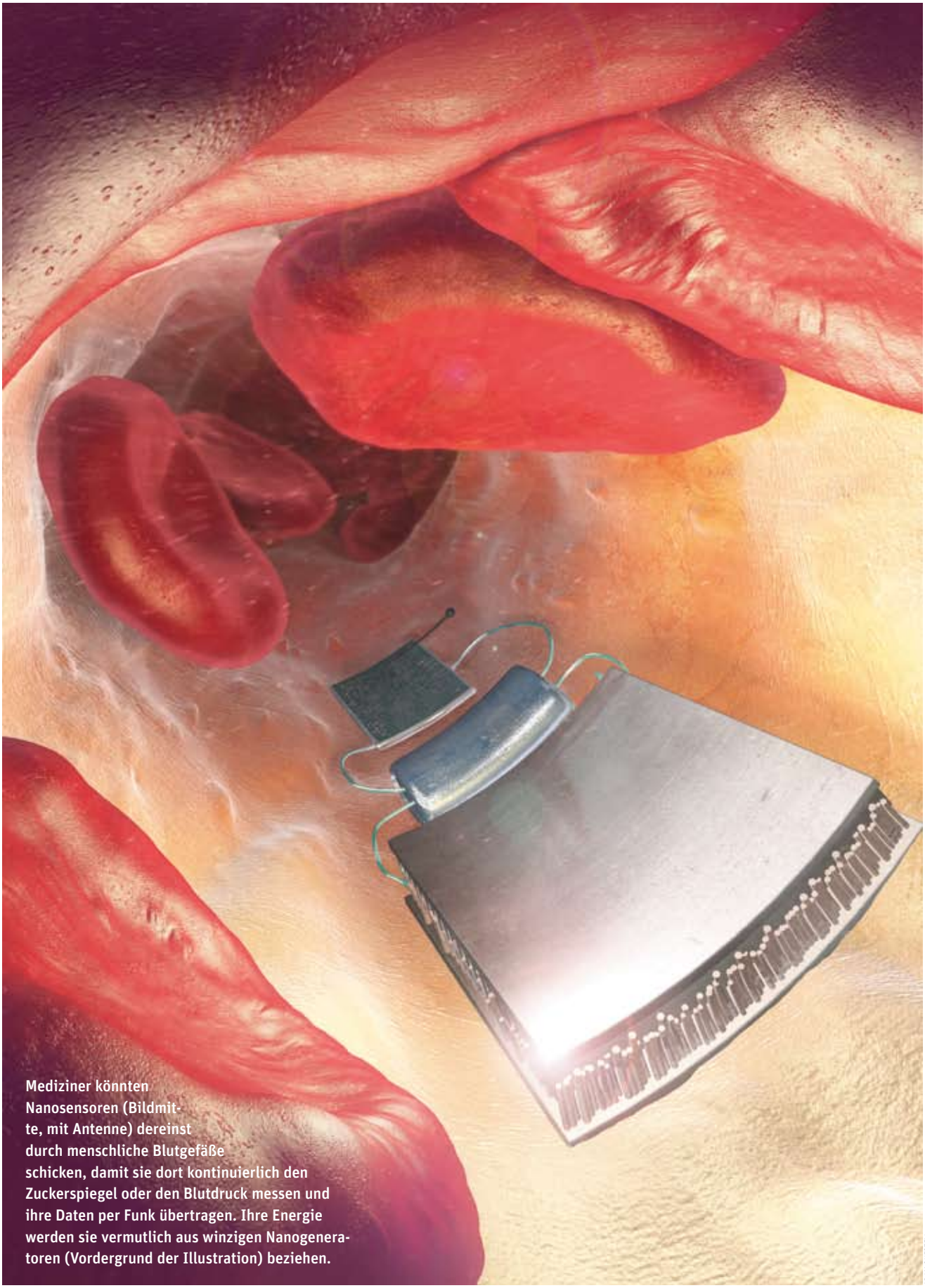
Energie aus dem Schuh?

Seit es in den späten 1990er Jahren immer attraktiver wurde, sich mit Fragen der Energieversorgung tragbarer elektronischer Geräte zu beschäftigen, haben Wissenschaftler schon große Fortschritte erzielt. Im Medienlabor des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, USA, wurde zum Beispiel ein Schuh entwickelt, der den piezoelektrischen Effekt nutzt. Dabei entsteht an der Oberfläche bestimmter kristalliner Materialien eine elektrische Spannung, sobald sie unter Druck geraten. Die Energieausbeute ist allerdings zu gering, um Handys oder Organizer zu betreiben.

Viele Forscher verlegten ihre Anstrengungen daher auf die Stromversorgung von MEMS. Solche mikroelektromechanischen Systeme auf Siliziumbasis besitzen Abmessungen in der Größenordnung von millionstel bis tausendstel Metern und benötigen sehr wenig Energie. Längst sind sie zum Beispiel als Beschleunigungsmesser in Airbagsystemen

In Kürze

- **Winzige Nanogeräte** besitzen ein riesiges Potenzial – vor allem dann, wenn wir sie mit Energiequellen ausstatten können, die die Nachteile von Batterien überwinden.
- **Ungenutzte Energiequellen** wie Vibrationen, Temperaturunterschiede oder sogar der menschliche Puls könnten genügend Energie bereitstellen, um solche winzigen Maschinen zu betreiben.
- **Nanogeneratoren könnten diese Energie »ernten«** und in elektrische Energie umwandeln. Felder aus piezoelektrischen Nanodrähten liefern schon heute kontinuierlich Strom.
- Zu den wahrscheinlichsten Einsatzgebieten gehören **medizinische Anwendungen**. Nanogeneratoren könnten Akkus von Herzschrittmachern aufladen oder drahtlose Minisensoren versorgen, die – in den Körper implantiert – den Blutzuckerspiegel überwachen.



Mediziner könnten Nanosensoren (Bildmitte, mit Antenne) dereinst durch menschliche Blutgefäße schicken, damit sie dort kontinuierlich den Zuckerspiegel oder den Blutdruck messen und ihre Daten per Funk übertragen. Ihre Energie werden sie vermutlich aus winzigen Nanogeneratoren (Vordergrund der Illustration) beziehen.

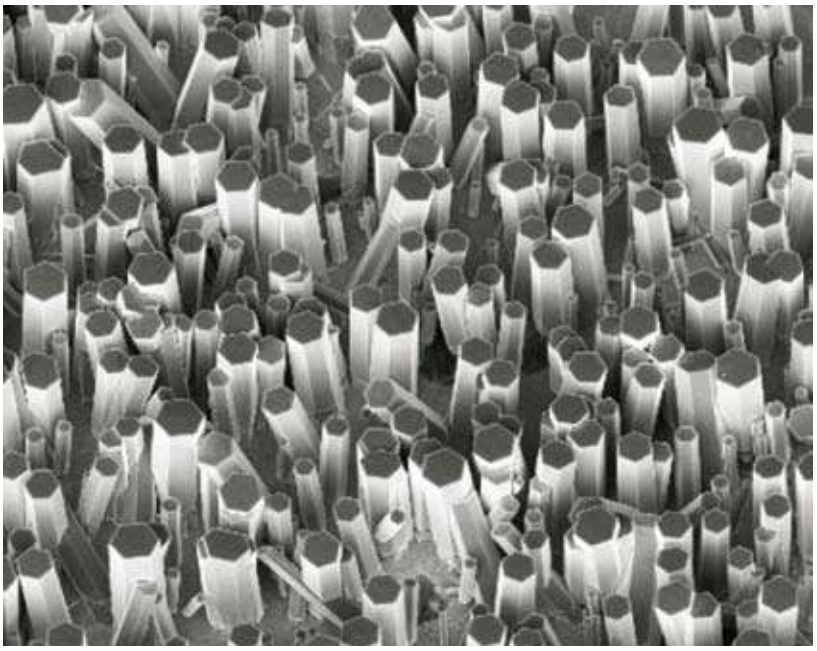
ADAM QUESTELL

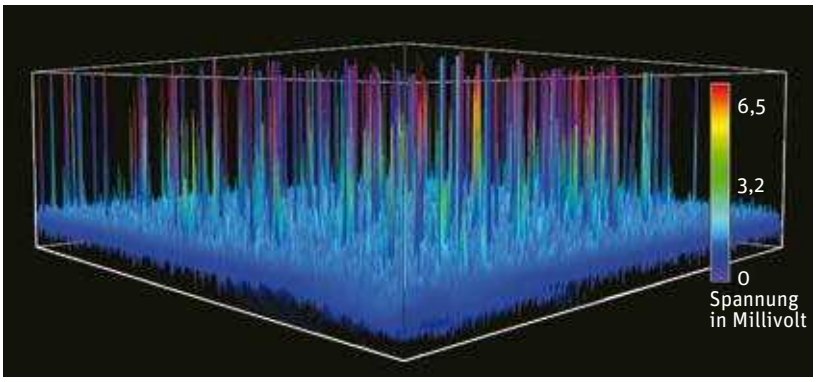
oder als Düsen in Tintenstrahldruckern im Einsatz.

In den vergangenen Jahren entwickelten Forscher zudem kleine, von Vibrationen angetriebene Generatoren, die neben dem piezoelektrischen Effekt auch elektromagnetische Phänomene ausnutzen. Dabei sorgen bewegliche Magnete oder Spulen dafür, dass Wechselströme induziert werden. Einige Mikrogeneratoren mit Abmessungen in der Größenordnung der MEMS wurden tatsächlich bereits hergestellt. Sie arbeiten mit Frequenzen zwischen 50 und 5000 Hertz, sind aber bis zu 75 Kubikzentimeter groß und damit vergleichsweise voluminös.

Zu den Bestandteilen eines typischen, von Vibrationen angetriebenen piezoelektrischen Generators gehört ein aus zwei übereinanderliegenden Schichten bestehender Streifen aus Bleizirkoniumtitanat. Der Streifen ist am einen Ende fixiert, während am frei schwingenden Ende eine Masse angebracht ist – vergleichbar einem Schwimmer auf einem federnden Sprungbrett. Biegt die Schwerkraft den Streifen nach unten, gerät die obere Schicht unter Zugspannung, die untere dagegen unter Druckspannung. Dabei entsteht einerseits positives, andererseits negatives elektrisches Potenzial. Schwingt die Masse nun auf und ab, bildet sich eine Wechselspannung aus. Damit dieses Prinzip tatsächlich funktioniert, muss der Generator allerdings relativ groß sein – nur dann nämlich versetzt die Schwerkraft die Masse in ausreichend starke Schwingung.

Ein Feld aus Zinkoxid-Nanodrähten, gesehen mit dem Rasterelektronenmikroskop (Bild oben). Die Drähte besitzen typischerweise Durchmesser zwischen 30 und 100 Nanometern und sind ein bis drei Mikrometer lang. Das Diagramm (unten) zeigt die Spannungsverteilung, die von einem solchen Feld erzeugt wird.





MIT FRDL. GEN. VON ZHONG LIN WANG

Energien aus strömenden Körperflüssigkeiten

Auf der Nanoskala sieht das anders aus. Meine Forschungsgruppe am Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA, arbeitet an winzigen piezoelektrischen Generatoren, bei denen die Schwerkraft, die eine so wichtige Rolle in der Welt des Großen spielt, ein vollkommen untergeordneter Akteur ist. Versuchte man, einen piezoelektrischen Generator mit Schwingungsstreifen auf der Nanoskala zu konstruieren, trüge die Gravitation so gut wie nichts zu dessen Bewegung bei – das Gerät würde schlicht nicht funktionieren. Hier zählen stattdessen die Kräfte chemischer Bindungen und die gegenseitige Anziehung von Molekülen.

Unser Team erforscht daher neuartige Nanotechnologien, um andere Energieformen auszunutzen: mechanische Energie, wie sie bei Körperbewegungen und der Dehnung von Muskeln frei wird, Schwingungsenergie, die in akustischen und Ultraschallwellen enthalten ist, und hydraulische Energie von strömenden Körperflüssigkeiten wie zum Beispiel Blut. Dabei verfolgten wir im Lauf der Zeit ganz unterschiedliche Ansätze. In den späten 1990er Jahren konzentrierte sich unsere Forschungsarbeit auf Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die damals im Mittelpunkt des Interesses standen. Wir erfanden einige Verfahren, um deren mechanische, elektrische und andere Eigenschaften in situ zu messen, also gewissermaßen live unter dem Mikroskop. Es gelang uns aber nicht, die elektrischen Eigenschaften dieser Nanoröhrchen in den Griff zu bekommen.

Dann stieß ich auf eine viel versprechende Alternative: Metalloxide könnten, so hoffte ich, die Basis einer völlig neuen Nanowelt werden. Im Jahr 2000 begann ich mit der Herstellung von »Nanogürteln«. Diese weißen, wolleartigen Produkte entstehen beim Backen eines Metalloxids wie etwa Zinkoxid bei 1200 Grad Celsius unter Anwesenheit von Argongas. Sie können als hochempfindliche Sensoren zum Einsatz kommen, da sich ihre Leitfähigkeit stark ändert, sobald einzelne Gas- oder Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche andocken.

Mittlerweile aber arbeiten wir vor allem mit Nanodrähten aus Zinkoxid. Diese Nanodrähte stehen wie die Halme eines Kornfelds senkrecht nebeneinander. Jeder Draht ist eine perfekt sechsseitige Kristallsäule, die auf einem festen, elektrisch leitfähigen Substrat herangewachsen ist. Bei ihrer Herstellung hilft das VLS-Verfahren (VLS steht für »vapor-liquid-solid«, gasförmig-flüssig-fest) aus der Halbleitertechnologie. Wir platzieren Nanopartikel aus Gold, die als Katalysator für das Kristallwachstum dienen, nebeneinander auf ein Saphirplättchen. Am heißeren Ende eines Quarzrohrofens erhitzen wir Zinkoxidpulver. Ein Strom aus Argongas transportiert das verdampfte Pulver dann zu den zu Tröpfchen geschmolzenen Goldpartikeln. Der Zinkoxiddampf kondensiert in den Goldtröpfchen und bildet kristalline Zinkoxidsäulen aus, die nach unten aus den Tröpfchen herauswachsen. Typischerweise sind solche Nanodrähte zwischen ein und drei Mikrometer lang und weisen Durchmesser zwischen 30 und 100 Nanometern auf.

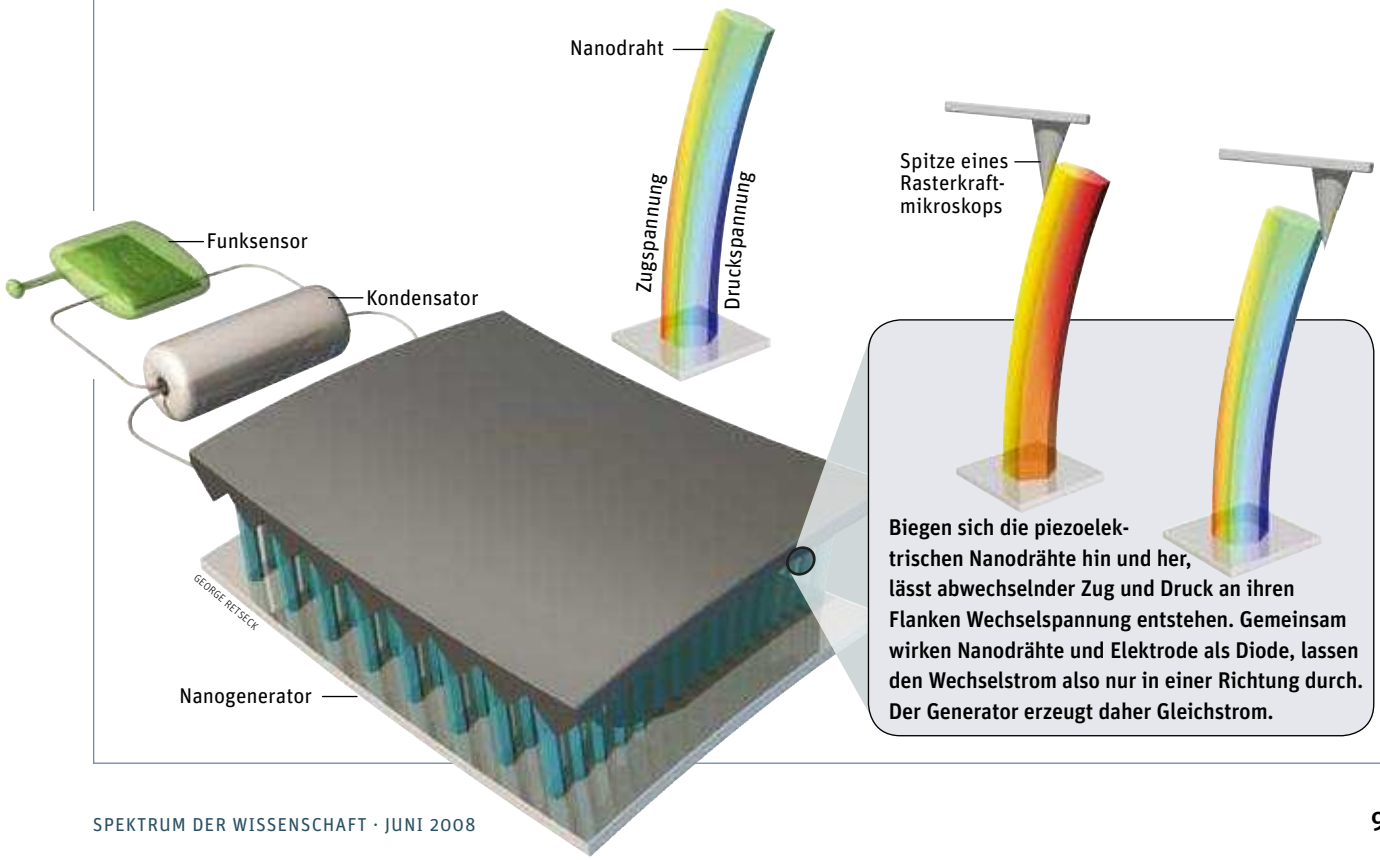
Um den August 2005 herum kam mir schließlich die Idee, mechanische Energie mit Hilfe solcher Nanodrähte in Elektrizität umzuwandeln. Mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops vermaßen wir damals gerade die elektromechanischen Wechselwirkungen zwischen den Nanodrähten. Als wir die Säulen mit der feinen Mikroskopspitze »antippten«, beobachteten wir elektrische Spannungsspitzen, deren Ursprung wir uns nicht erklären konnten. Als wir sie den November hindurch systematisch untersuchten, wurde uns aber klar, dass sie dem piezoelektrischen Effekt des Zinkoxids zu verdanken sind. Andere Ursachen wie etwa statische Aufladung durch Reibung oder elektrische Spannungen durch den Kontakt unterschiedlicher Materialien konnten wir ausschließen.

Der nächste Schritt war die Suche nach dem Prozess, der einzelne Nanodrähte anregt, elektrische Ladung abzugeben. In einem Buch über Halbleiterstrukturen fand ich die entscheidenden Hinweise und konnte schließlich den Mechanismus beschreiben, auf dessen Basis

Die entscheidende Idee war, mechanische Energie mit Hilfe von Nanodrähten in Elektrizität umzuwandeln

Von mechanischer zu elektrischer Energie

Ein Nanogenerator (unten) besteht aus einem Feld senkrecht angeordneter Zinkoxid-Nanodrähte. Die sechsseitigen Kristalle besitzen zugleich piezoelektrische und halbleitende Eigenschaften. Auf ihnen liegt eine rechteckige Elektrode mit einer gezackten Unterseite auf, die auf äußere Kräfte mit seitlichen Bewegungen reagiert. Die Kräfte können von Vibrationen, vom menschlichen Puls oder von akustischen Wellen stammen. Ein Kondensator kann die vom Generator produzierte elektrische Energie zwischenspeichern beziehungsweise in regelmäßigen Abständen einen Sensor betreiben, der den Blutzuckerpegel oder den Blutdruck misst. Ein winziger Sender leitet die Daten schließlich an die Außenwelt weiter.



Biegen sich die piezoelektrischen Nanodrähte hin und her, lässt abwechselnder Zug und Druck an ihren Flanken Wechselspannung entstehen. Gemeinsam wirken Nanodrähte und Elektrode als Diode, lassen den Wechselstrom also nur in einer Richtung durch. Der Generator erzeugt daher Gleichstrom.

WIE VIEL ENERGIE PRODUZIERT UNSER KÖRPER?

Blutfluss

0,93 Watt mechanische Leistung
0,16 Watt elektrische Leistung eines Nanogenerators
0,16 Joule elektrische Energie pro Herzschlag

Ausatmen

1,00 Watt mechanische Leistung
0,17 Watt elektrische Leistung eines Nanogenerators
1,02 Joule elektrische Energie pro Atemzug

GETTY IMAGES / TIM PLATT

Einatmen

0,83 Watt mechanische Leistung
0,14 Watt elektrische Leistung eines Nanogenerators
0,84 Joule elektrische Energie pro Atemzug

Obere Gliedmassen

3,00 Watt mechanische Leistung
0,51 Watt elektrische Leistung eines Nanogenerators
2,25 Joule elektrische Energie pro Bewegung

Gehen

67,00 Watt mechanische Leistung
11,93 Watt elektrische Leistung eines Nanogenerators
18,90 Joule elektrische Energie pro Schritt

Tastaturschreiben

6,9 bis 19,0 Milliwatt mechanische Leistung
1,2 bis 3,2 Milliwatt elektrische Leistung eines Nanogenerators
226 bis 406 Mikrojoule elektrische Energie pro Bewegung

GETTY IMAGES / PM IMAGES

unsere Nanogeneratoren seither funktionieren. Zinkoxid besitzt sowohl piezoelektrische als auch halbleitende Eigenschaften – eine seltene Kombination. Beide nutzen wir aus, um elektrische Ladungen in den Nanodrähten zu erzeugen und zu sammeln. Wir konnten nachweisen, dass in einem Zinkoxid-Nanodraht, der von der extrem dünnen Spitze eines Rasterkraftmikroskops verbogen wird, ein Feld mechanischer Spannung entsteht. Seine gedehnte Flanke weist dabei eine positive Zugspannung auf, die gestauchte Seite eine negative Spannung. Lassen wir die elektrisch leitende Mikroskopspitze über ein ganzes Feld solcher Nanodrähte streichen, kommt es bei jedem Kontakt zwischen ihr und einem Draht zu einer elektrischen Spannungsspitze. Grund dafür ist der piezoelektrische Effekt, der im Inneren des Nanodrahts ein elektrisches Feld zwischen den unterschiedlichen Potenzialen der gedehnten und der gestauchten Flanke entstehen lässt.

Kurz vor Weihnachten 2005 entwarf ich ein Experiment, um die elektrische Spannung, die an einem langen Nanodraht anliegt, mit Hilfe eines optischen und eines Rasterkraftmikroskops zu visualisieren. Gemeinsam mit meinem Studenten Jinhui Song gelang mir gegen Ende Dezember die Aufnahme einiger Videosequenzen, die einen direkten Nachweis der Gültigkeit meines theoretischen Modells darstellten. Dann bearbeiteten wir die Bilder und sandten schließlich einen Fachaufsatz an das US-amerikanische Wissenschaftsjournal »Science«.

Die nächste Herausforderung bestand darin, ein leistungsfähiges Design zu entwicken. Drei Ziele strebten wir an. Zum einen mussten wir die Spitze des vergleichsweise riesigen Rasterkraftmikroskops durch einen in den Generator integrierten Gegenkontakt ersetzen. Außerdem mussten wir möglichst viele Nanodrähte so anregen, dass sie simultan und kontinuierlich Energie erzeugen. Und schließlich sollte sich der Generator von außerhalb mit Energie versorgen lassen, zum Beispiel in Form von Ultraschallschwingungen, um autark arbeiten zu können.

Zunächst entwickelte ich ein neues Design, in dem das Mikroskop durch eine an der Unterseite gezackte Elektrode ersetzt wurde. Mein Postdoktorand Xudong Wang musste fast vier Monate lang experimentieren, bevor er mit dem Versuchsaufbau die ersten Daten sammeln konnte. Er maß allerdings nur ein sehr kleines elektrisches Signal. Zwischen Mai und Oktober 2006 konzentrierten wir uns daher darauf, den Aufbau des Nanogenerators zu optimieren, um seine Leistung zu erhöhen. Gegen Ende des Jahres konnten wir ihn schließlich der wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorstellen.

Unser experimenteller Aufbau wies erstmals nach, dass ein Nanogenerator kontinuierlich elektrischen Gleichstrom liefern kann. Er besteht aus einem Feld von parallel nebeneinander stehenden Zinkoxid-Nanodrähten, das von einer platinbeschichteten Siliziumelektrode mit gezackter Unterseite überdeckt wird. Den Abstand der Elektrode zu den Nanodrähten können wir präzise kontrollieren.

Die Platinbeschichtung erhöht die elektrische Leitfähigkeit der Elektrode und verleiht ihr im Kontakt mit den Nanodrähten die Eigenschaften einer Diode. Wie ein Ventil lässt diese den Wechselstrom aus den hin- und herschwingenden Drähten in nur einer Richtung fließen, nämlich vom Metall zum Halbleiter. Bewegt sich die Elektrode seitlich, biegt ihre gezackte Unterseite die Drähte um – sie übernimmt also die Funktion vieler nebeneinander angeordneter Mikroskopspitzen.

Biokompatible Alternative gesucht

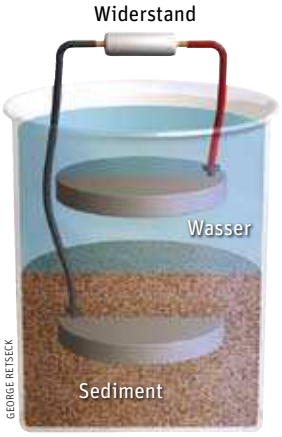
Seit Januar 2007 sind wir nun vollauf mit der Verbesserung unseres Nanogenerators beschäftigt. Die Keramik- oder Halbleitersubstrate, auf deren Oberflächen wir unsere Nanodrähte ursprünglich hatten wachsen lassen, sind hart und spröde und daher ungeeignet für Anwendungen, die eine faltbare oder biegsame Energiequelle benötigen. Biosensoren, die in Muskeln oder Gelenke implantiert werden sollen, oder Energiegeneratoren in Schuhen lassen sich so nicht realisieren. Als »biokompatible« Alternative bieten sich stattdessen elektrisch leitfähige Polymere an. In Experimenten fanden wir nämlich heraus, dass sich viele Plastiksubstrate eignen, um auf ihnen Zinkoxid-Nanodrahtfelder heranzuzüchten, die schließlich in mobilen und flexiblen Elektronikgeräten Anwendung finden könnten.

Durch die Flexibilität des Substrats bilden nun allerdings die Spitzen der Nanodrähte ein welliges Profil aus. Die Auflagefläche für die Elektrode ist also uneben, es kommt zu Fehlkontakten. Um den Generator leistungsfähiger und damit fit für den Einsatz zu machen, müssen wir die Effizienz der elektrischen Entladung noch verbessern, indem wir die Stärke der Verbindung zwischen Nanodrähten und Substrat und zudem die Abstände zwischen den Drähten optimieren.

Die großtechnische und kostengünstige Herstellung der Nanodrahtfelder liegt im Bereich des Möglichen, weil dazu keine teuren Hochtemperaturprozesse nötig sind. Die eigentlichen Hürden liegen derzeit noch anderswo. Wir müssen lernen, wie wir die Nanodrähte perfekt gleichmäßig wachsen lassen und ihre

Ernten von Energie aus der Umwelt

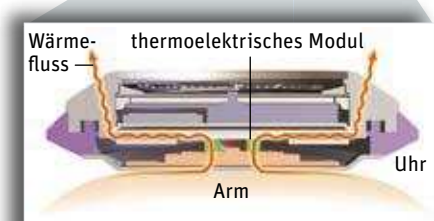
Neben piezoelektrischen Nanogeneratoren gibt es weitere Möglichkeiten, der Umwelt Energie zu entziehen. Die effizientesten Ernteprozesse sind in der Natur selbst entstanden. Derek R. Lovley und seine Mitarbeiter an der Universität von Massachusetts in Amherst (USA) entdeckten zum Beispiel eine besondere Fähigkeit des auf dem Meeresgrund lebenden Bakteriums *Desulfuromonas acetoxidans*: Es kann Elektronen aus Essigsäure, die von anderen Organismen in den Sedimenten ausgeschieden wurde, zu Grafitelektroden transportieren. Den entstehenden Strom kann man zu einer zweiten Elektrode fließen lassen (Bild). Solche Sedimentbatterien könnten zum Beispiel giftige Abfälle biologisch abbauen. Auf ähnliche Weise könnten Mikroorganismen Elektrizität durch katalytische Reaktionen mit verschiedenen Kohlenhydraten und anderen Stoffen produzieren.



Meeresorganismen treiben eine Sedimentbatterie an.

2004 stellte eine Gruppe um A. K. Shukla am Zentralen Elektrochemischen Forschungsinstitut in Südindien den Prototyp einer biologischen Brennstoffzelle vor. Sie nutzt organische Stoffe und Stoffwechselprozesse, um Strom zu erzeugen. Tatsächlich lassen sich die Ressourcen unseres Körpers einschließlich der Stoffwechselprozesse unserer Zellen anzapfen, um mit der gewonnenen Energie medizinische Geräte wie Herzschrittmacher, Systeme zur kontrollierten Gabe von Medikamenten und winzige Diagnosesensoren zu betreiben. Mikrobische Brennstoffzellen sind allerdings vergleichsweise groß; auch reicht ihre Leistung für Anwendungen außerhalb der Biologie möglicherweise nicht aus.

Eine weitere Option sind thermoelektrische Generatoren, die den Seebeck-Effekt ausnutzen: Verbindet man die Enden zweier Streifen aus verschiedenen Metallen, die unterschiedliche Temperaturen aufweisen, entsteht ein elektrisches Potenzial, weil Elektronen von der warmen zur kalten Seite der Metallstreifen wandern und dabei positiv geladene Ionen hinterlassen. Die thermoelektrische Spannung ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen.



Ein thermoelektrischer Generator nutzt Temperaturdifferenzen.

Obgleich auch die Thermoelektrik ein faszinierendes Arbeitsgebiet ist, sind entsprechende Generatoren doch ziemlich groß, schließlich müssen ihre Enden eine ausreichend hohe Temperaturdifferenz aufweisen. Als Energiequellen von Nanosystemen sind sie daher nur eingeschränkt nützlich. Trotzdem findet das Prinzip schon kommerzielle Anwendung wie in der 1998 entwickelten und in einer Sonderserie auf den Markt gebrachten Armbanduhr Seiko Thermic. Ihre thermoelektrischen Module erzeugen aus dem geringen Temperaturgefälle zwischen dem Arm des Trägers und der Umgebung genügend Leistung im Mikrowattbereich, um die Uhrmechanik anzutreiben. ›› Z. L. W.

Lebensdauer verlängern können. Das derzeitige Modell unseres Nanogenerators arbeitet fünfzig Stunden lang, dann versagt es. Ursache dafür ist vermutlich das Verfahren, mit dem wir die Elektrode auf das Feld aus Nanodrähten aufsetzen. Drückt sie beispielsweise zu fest auf die Drähte, entsteht kein Strom.

Fortschritte haben wir bereits bei der Verbindung zwischen Nanodrähten und Substrat gemacht. Beim Prozess zur Herstellung der Felder wird auf das Substrat ein dünner Goldfilm aufgedampft. Das Gold fungiert dann in der schon beschriebenen Weise als Katalysator: Es lässt Zinkoxidkristalle wachsen, so dass am Schluss ein regelrechter Kristallwald aus Bäumen ohne Zweige entsteht. Die »Wurzeln« dieses Nanowalds können wir mittlerweile besser in das Substrat einbetten, indem wir, nachdem die »Bäume« gewachsen sind, eine zusätzliche dünne Polymerschicht darauf aufbringen.

Mit einem sechs Quadratmillimeter großen Generator erreichen wir inzwischen eine Betriebsspannung von 10 Millivolt und eine Stromstärke von 800 Nanoampere. Wir konnten auch nachweisen, dass sich solche Generatoren wie übliche Batterien oder Brennstoffzellen verhalten: Sie lassen sich in Reihe schalten, um die Ausgangsspannung zu steigern, eine Parallelschaltung erhöht dagegen den Ausgangsstrom. Um höhere Spannungen pro Generator zu erzielen, müssen wir nun aber alles daransetzen, Nanodrähte gleicher Höhe und gleicher Durchmesser herzustellen.

Trotzdem: Auch künftige Nanogeneratoren werden vermutlich nicht einmal eine Taschenlampe mit Strom versorgen können, ihre Leistung wird immer sehr gering bleiben. Für Geräte aber, die nur gelegentlich aktiv werden – wie zum Beispiel Sensoren, die in jeder Minute nur eine Sekunde lang Daten sammeln und übertragen – könnten Felder aus Nanodrähten ideale Energieversorger sein. Sicherlich aber werden Nanogeneratoren eingesetzt werden, um jene Energie zu gewinnen und zu recyceln, die wir tagtäglich verschwenden, ob sie nun vom Luftdruckwechsel im Autoreifen, von den mechanischen Vibrationen eines fahrenden Autos oder sogar von der flatternden Stoffwand eines Campingzelts herrührt. Man muss nicht lange suchen, um die vielen kleinen Energiequellen überall um uns herum aufzuspüren – es wird Zeit, dass wir viele von ihnen auch nutzen. ◁

Zhong Lin Wang ist Direktor des Zentrums zur Charakterisierung von Nanostrukturen am Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA. 1998 entwickelte er eine Nanowaage, die weltweit kleinste ihrer Art, und entdeckte im Jahr 2000 den »Nanogürtel«. Zu seinen vielen Auszeichnungen gehört die Burton-Medaille der Microscopy Society of America des Jahres 1999.

Gao, P. X. et al.: Nanowire Piezoelectric Nanogenerators on Plastic Substrates as Flexible Power Sources for Nanodevices. In: Advanced Materials, Bd. 19, S. 67 – 72, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/951090.

ERDÖLRAFFINERIEN

Sieden, Cracken, Veredeln

Damit aus Erdöl Sprit oder Plastik wird, muss das schwarze Gold erst einmal verdampfen.

Von Bernhard Gerl und Mark Fischetti

Nur von wenigen Ressourcen ist die Menschheit so abhängig wie vom Erdöl, das sich durch Druck und Hitze über Jahrmillionen aus dem Plankton urzeitlicher Meere gebildet hat. Es ist ein Stoffgemisch aus mehreren hundert Komponenten, hauptsächlich Kohlenwasserstoffverbindungen. Und genau diese machen Erdöl so wertvoll, als Rohstoff für die chemische Industrie, als Treibstoff für Verbrennungsmotoren.

Benötigt werden vor allem kurze Verbindungen: Aus Ketten mit drei bis vier Kohlenstoffatomen wie Propan und Butan synthetisiert man Kunststoffe, fünf bis elf ergeben Benzin (je komplexer das Molekül, desto stärker lässt es sich bis zur spontanen Zündung verdichten, was den Motorwirkungsgrad verbessert); aus noch längeren Ketten bestehen Diesel, Heizöl, Schmierstoffe und der für den Straßenbau benötigte Asphalt. Weil diese Moleküle bei unterschiedlichen Temperaturen verdampfen, lassen sie sich aus dem Rohöl durch Destillation gewinnen – je kürzer die Ketten, desto niedriger liegt ihr Siedepunkt. Bei Atmosphärendruck sind Propan und Butan bereits bei Raumtemperatur gasförmig, die Rohstoffe für Benzin verdampfen zwischen 35 und 210 Grad Celsius, die für Schmieröle erfordern 400 Grad Celsius.

Das Rohöl wird deshalb nach dem Entsalzen – das vermeidet Korrosion in der Anlage – in einem Röhrenofen bei 350 Grad Celsius teilweise verdampft und das Gemisch aus Gas und Flüssigkeit dann in eine bis zu 50 Meter hohe Destillationskolonne geleitet, den Fraktionierturm. Darin herrscht normaler Atmosphärendruck und ein konstanter Temperaturgradient von etwa 400 Grad Celsius unten bis 20 Grad oben. Die Kohlenwasserstoffe steigen auf, bis sie in einen Temperaturbereich kommen, der unterhalb ihres jeweiligen Siedepunkts liegt. Dort kondensieren sie und sammeln sich auf Destillationsböden (noch gasförmige Fraktionen strömen durch Löcher in diesen Böden weiter nach oben), Rohrleitungen führen sie der Weiterverarbeitung zu. Am Boden des Destillationsturms sammeln sich schwere Moleküle aus mindestens 20 Kohlenstoffatomen. Sie können bei Atmosphärendruck nicht destilliert werden, weil sie ab 330 Grad Celsius zerbrechen würden. Der Trick: Ein Vakuum von 50 Millibar Luftdruck senkt den Siedepunkt um 100 Grad.

Welche Produkte in welcher Menge anfallen, hängt von der Zusammensetzung des Rohöls ab. Weil der Bedarf an kurzkettigen Molekülen aber größer ist, werden längere in einem weiteren Verfahrensschritt aufgebrochen (englisch: *crack*). Das geschieht beim thermischen Cracken durch Druck und kurzzeitige Erhitzung auf etwa 500 Grad Celsius. Wird zudem ein Katalysator verwendet, verbessert sich die Umsetzungsrate. Stets aber resultieren verschieden schwere Fraktionen, die durch Destillation voneinander zu trennen und weiterzuverarbeiten sind.

Die Produkte enthalten noch einige zehntel bis einige Prozent Schwefel, der in so genannten Claus-Anlagen entfernt werden muss, um bei der Verbrennung giftige beziehungsweise umweltschädliche Schwefelverbindungen zu vermeiden. In Deutschland darf Benzin seit 2003 maximal zehn Schwefelatome pro eine Million Kohlenstoffketten enthalten.

Obwohl mehr als 90 Prozent der Grundsubstanzen der chemischen Industrie aus Erdöl oder Erdgas gewonnen werden, gehen doch weniger als zehn Prozent der weltweit geförderten Erdölmenge diesen Weg. Der größte Teil wird zu Kraftstoffen. Doch das Rohbenzin, das nach den Schritten Cracken und Entschwefeln resultiert, wäre noch nicht für einen Motor geeignet – bei der Verdichtung würde sich das Benzin-Gas-Gemisch unkontrolliert entzündet (Klopfen). Zur »Veredelung« setzt ein Reformer kurze, lineare Ketten des Rohbenzins in solche mit verzweigten oder ringförmigen Strukturen um. Auch diese Modifikation erfolgt mit Hilfe von Katalysatoren, meist Platin, bei etwa 500 Grad Celsius und einem bis fünf Megapascal Druck, also dem 10- bis 50-Fachen des Atmosphärendrucks. Bei der Reformierung entstehen überdies Ausgangsstoffe für die Herstellung von Aromaten wie Benzol und Toluol, die als Lösungsmittel und Zwischenprodukte in der chemischen Industrie eine wichtige Rolle spielen.

Zur Veredelung gehören des Weiteren das Mischen verschiedener Destillationsfraktionen oder die Beigabe von Zusatzstoffen, so genannten Additiven, beispielsweise um die Klopffestigkeit von Benzin zu optimieren, Ablagerungen in Verbrennungsmotoren zu verhindern oder Schmieröle auch bei hohen Temperaturen viskos zu halten.

Bernhard Gerl ist freier Technikpublizist in Mainz, **Mark Fischetti** ist Redakteur bei »Scientific American«.

In der Raffinerie trennt ein Temperaturgradient von 400 Grad Celsius am Boden einer Destillationskolonne bis 20 Grad Celsius an ihrer Spitze die verschiedenen Kohlenwasserstofffraktionen im Rohöl. Durch perforierte Destillationsböden steigt das Gasflüssigkeitsgemisch auf. Wird der Siedepunkt einer Fraktion unterschritten, kondensiert diese in einer Blasenkappe und läuft dann durch den Boden ab 1. Beim katalytischen Cracken mischt man längere Kohlenwasserstoffe mit einem Katalysator und erhitzt sie 2. Sie zerbrechen in kürzere Ketten; der Katalysator lässt sich durch Abbrennen von Kohlenstoffresten regenerieren. Zur Veredelung von Rohbenzin baut ein katalytischer Reformer kürzere, unverzweigte Kohlenwasserstoffe mittels Katalysatoren in verzweigte oder ringförmige um und erhöht so die Klopffestigkeit 3.

Wussten Sie schon?

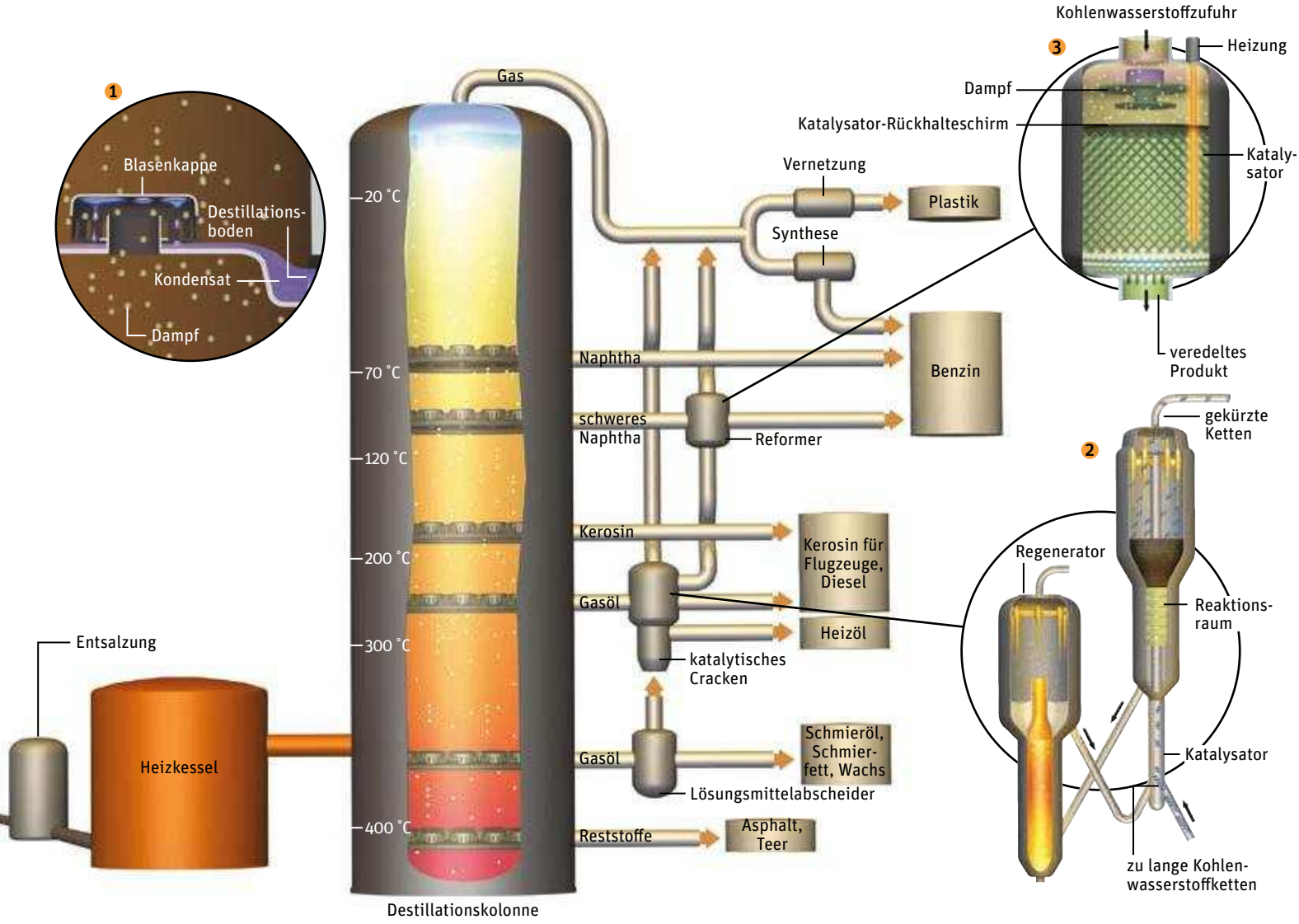
▶ **Als in den 1850er Jahren Walöl** für Lampen knapp wurde, verarbeitete man natürlich zu Tage tretendes Erdöl zu Petroleum. Gezielte Bohrungen verliefen zunächst erfolglos, etwa die des deutschen Bodenkundlers Ludwig Meyn im damals zu Dänemark gehörenden Dithmarschen. Mehr Glück hatte 1959 der ehemalige Lokführer Edwin Drake, der im Auftrag eines Industriellen nahe der Kleinstadt Titusville (US-Bundesstaat Pennsylvania) nach Öl bohrte. Neben Petroleum wurde aus dem Rohöl auch Paraffin für Kerzen hergestellt. Das leicht flüchtige Benzin (amerikanisch: *gasoline*) galt als unerwünschtes Nebenprodukt und wurde abgefackelt. Nach wie vor fördert Titusville geringe Mengen Erdöl – und verkauft es in Flaschen an Touristen.

▶ **Wegen des Aufwands verdienen Raffineriebetreiber** nach eigenen Angaben nur wenige Cent an einem Liter, das entspricht 20 bis 25 Prozent der reinen Produktkosten (in Deutschland sind das etwa 25 Prozent des Benzinpreises, 75 Prozent sind Steuern). Investitionen in bestehende Anlagen oder der Bau neuer wurde deshalb weltweit nur zögerlich angegangen, inzwischen treiben Kapazitätsengpässe aber die Produktkosten in die Höhe. Nun reagiert die Industrie: Für gut 2,6 Milliarden Euro wurde zum Beispiel die Total Raffinerie Mitteldeutschland in Leuna errichtet, 4,5 Milliarden Euro steckt ein Joint Venture von Shell und Saudi Aramco bis 2010 in eine texanische Anlage.

▶ **Manche Rohölsorten enthalten** gelöstes Propan und Butan, das ganz oben aus dem Fraktionierungsturm ausströmt. Propan lässt sich zu Polypropylen für Textilien, Nahrungsmittelverpackungen und Automobilteile umwandeln. Aus Butan gewinnt man Butadiene für synthetischen Gummi. Ethylen (C_2H_4) ist das Ausgangsmaterial für Polyethylen in Plastikbechern und Verpackungen; es wird bei niedrigem Druck und hoher Temperatur in einem thermischen Cracker erzeugt.

▶ **Die Oktanzahl** gibt an, wie leicht sich Benzin bei der Verdichtung selbst entzünden kann (Klopffestigkeit). Es handelt sich um eine Vergleichsgröße: Der Wert entspricht dem Anteil von Isooktan zu n-Heptan in einem Gemisch gleicher Klopffestigkeit; Ersteres ist sehr klopffest, Letzteres entzündet sich schnell. Beispielsweise hat Superbenzin mit einer Oktanzahl von 95 die gleiche Klopffestigkeit wie ein Treibstoff, in dem sich 95 Volumenprozent Isooktan und 5 Prozent n-Heptan befinden.

GEORGE RETSECK



ASTRONOMIE

Eine Nullnummer

Die »Reise zur Stunde null« bietet überwältigende Bilder – viel mehr aber auch nicht.

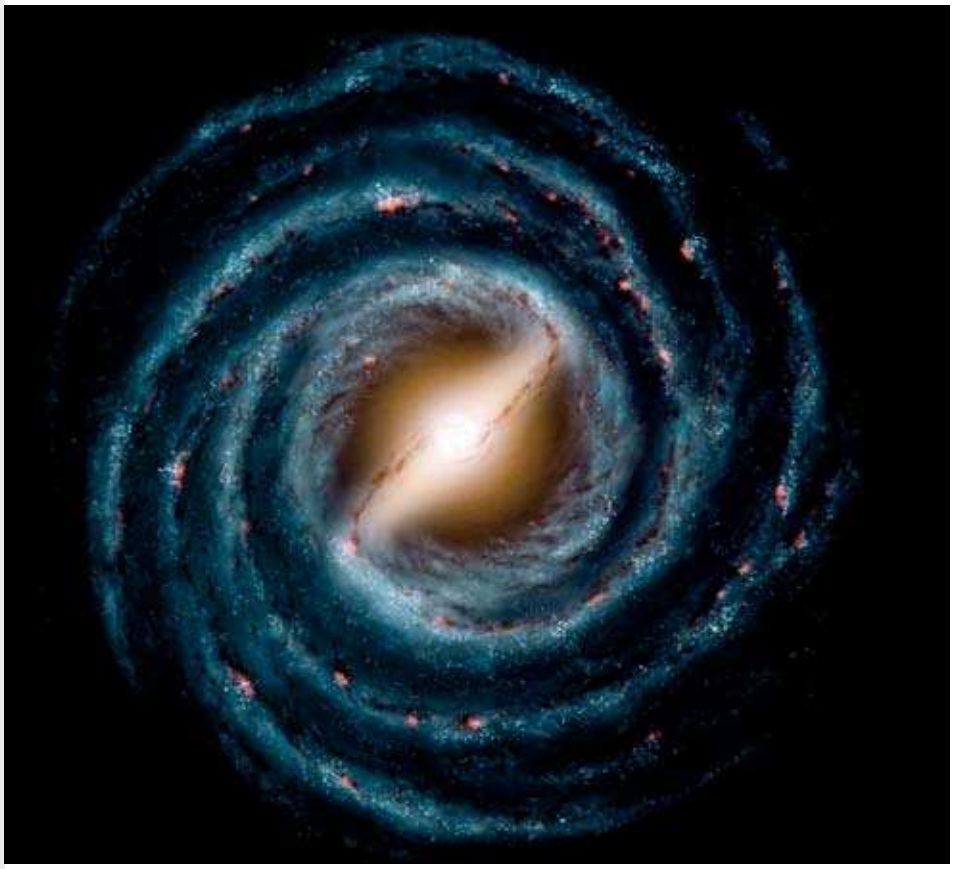
Die Brüder Igor und Grichka Bogdanov sind in Frankreich ziemlich bekannt. Sie moderierten dort seit 1979 mehrere Fernsehsendungen, in denen es um populärwissenschaftliche Themen und Sciencefiction ging. Ihre Show »Temps X« lief zehn Jahre lang, wurde mehrfach kopiert und brachte ihren Machern einige Berühmtheit ein.

Bekannt wurden sie allerdings auch auf andere Weise. Vor sechs Jahren veröffentlichten sie mehrere Artikel in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, darunter den »Annals of Physics« und »Classical and Quantum Gravity«. Kurz nach Erscheinen meldeten sich zahlreiche Physiker zu Wort, allen voran der Deutsche Max Niedermaier und der Amerikaner John Baez, die diese Arbeiten als pseudowissenschaftlich, ja sogar als Nonsens bezeichneten. Es ging das Gerücht um, die Bogdanovs hätten einen Hoax publiziert, eine absichtliche Falschdarstellung zur Irreführung des Publikums. Die beiden Fernsehjournalisten blieben allerdings dabei, dass ihre Artikel hochseriös seien. Obwohl die Affäre nach einiger Zeit im Sand verlief, hat sie das wissenschaftliche Renommee der Brüder nachhaltig beschädigt.

Nun haben sie ein opulent bebildertes Buch zu Kosmologie und Astronomie veröffentlicht. Sie beschreiben unser Sonnensystem, die Milchstraße und die Struktur des Weltalls, erörtern die Frage, ob es auch auf anderen Planeten Leben geben kann, und umreißen die Entwicklung des Universums seit dem Urknall. Der bekannte Fernsehmoderator Joachim Bublath hat das Vorwort geschrieben.

Auf den ersten Blick macht das Werk einen fabelhaften Eindruck. Großformatige, fantastische Bilder zeigen die Oberfläche ferner Planeten und Monde, Riesensonnen und Neutronensterne, Elementarteilchen, die Erde kurz nach ihrem Entstehen und das Universum kurz nach dem Urknall. Wo keine Kamera zur Hand war, müssen künstlerische Darstellungen der Vorstellungskraft des Lesers aufhelfen.

So stellt sich das Milchstraßensystem einem hypothetischen Betrachter von außen dar.



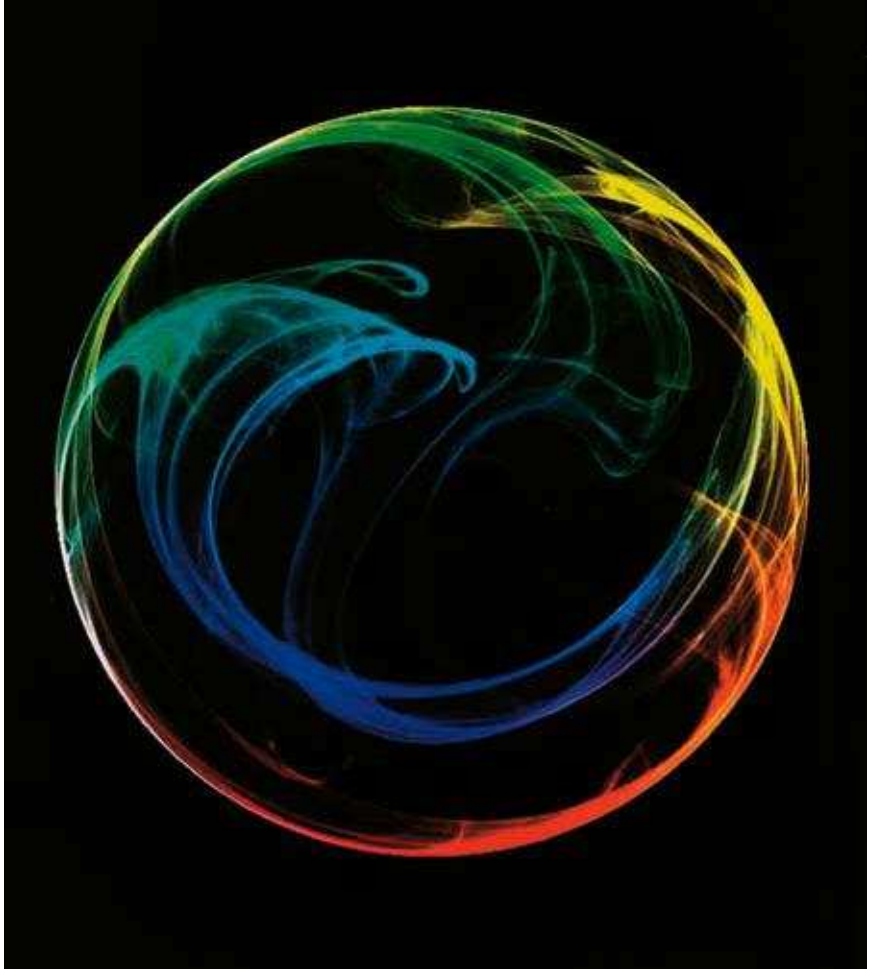
Leider verfliegt die anfängliche Begeisterung sehr schnell, sobald man zu lesen beginnt. Der Text enthält massenweise Fehler und wird mit jeder Seite konfuser. Die Bogdanovs, obwohl in Physik (Igor) und Mathematik (Grichka) promoviert, haben offenbar große Schwierigkeiten mit Zahlen. So hat angeblich ein Neutronenstern einen Durchmesser von zehn Metern (gemeint sind vermutlich Kilometer), die Wolken der Venus erheben sich zehntausende Kilometer hoch (es sind mehrere zehn Kilometer), das sichtbare Universum hat einen Radius von 46 Millionen statt 46 Milliarden Lichtjahren, und der Mond ist 30 Kilometer über der Erde entstanden (richtig sind 30 000 Kilometer). An anderer Stelle behaupten die Autoren, dass eine Sternexplosion heller leuchte als »sämtliche Galaxien im Universum zusammen« – was beeindruckend klingt, aber Unsinn ist.

Zudem verstrickt sich das Buch in Widersprüche. Da heißt es an einer Stelle, dass der Mond »in weniger als einem Dutzend Jahren« aus kosmischen Trümmern entstanden sei. Wenige Zeilen weiter unten steht, dass sich diese Trümmer »im Lauf von Jahrmillionen« zum Mond zusammengefügt haben. Wie es ein solcher Schnitzer durchs Lektorat schaffen konnte, bleibt das Geheimnis des Verlags.

»Reise zur Stunde null« krankt aber nicht nur an falschen Fakten. Der Inhalt an sich ist absurd, und zwar umso schlimmer, je mehr es ins Detail geht. So schreiben die Bogdanovs, dass siliziumbasierte Lebewesen »einer Art Kristallschwamm« ähneln müssten, eine »statische, langsame Existenz« führen würden und »ihren Durst nur mit Benzol stillen« könnten. Woher sie diese erstaunlichen Einsichten haben, verschweigen sie.

Praktisch auf jeder Seite wartet das Buch mit solchen zweifelhaften Geistesblitzen auf. Die Krönung sind Sätze wie »Wieder stellen wir uns vor, dass hinter der Planck'schen Mauer eine verformte Raumzeit zum Vorschein kommt, die aus der Superposition (+++±) der Lorentz'schen Raumzeit (+++–) und der euklidischen vierdimensionalen Raumzeit (++++) stammt.« Ähnliches hat Grichka Bogdanov schon in seiner äußerst umstrittenen Doktorarbeit geschrieben – ein »Potpourri von Modewörtern der modernen Physik, das völlig inkohärent ist«, wie sich Hermann Nicolai ausdrückte, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in

So sieht nach Igor und Grichka Bogdanov das Universum im Augenblick seiner Geburt aus. Die Farben »könnten eine Erklärung für die Quantenunsicherheit sein und für die sich fortwährend verändernden Schwingungen bei der Krümmung des Raumes sowie von Raum und Zeit selbst.«



Potsdam. Dass so gut wie niemand mit solchen Sätzen etwas anfangen kann, scheint den Verlag nicht gestört zu haben.

Blättern Sie das Werk durch und genießen Sie die schönen Bilder. Den Text können Sie sich getrost sparen.

Frank Schubert

Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Igor und Grichka Bogdanov
Reise zur Stunde null
Die Ursprünge des Universums
Aus dem Französischen von Julian Löffler und Nikola Kolig.
Theiss, Stuttgart 2008. 200 Seiten,
€ 34,90 bis 31. 12. 2008, danach € 39,90

WELTKLIMA

Nur vermeintlich ausgewogen

Der Wille zum Guten steht – wieder einmal – einer objektiven Darstellung der Klimadebatte im Weg.

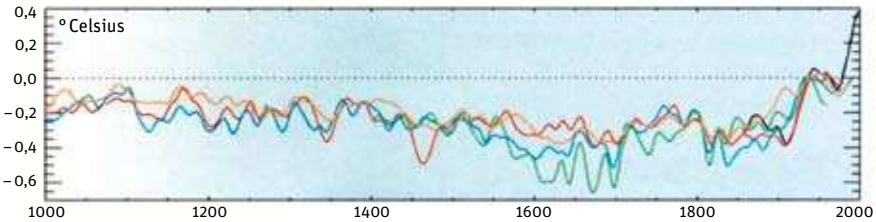
An Büchern zum Thema Klimawandel herrscht wahrlich kein Mangel mehr – aber dieses verspricht eine anregende Lektüre. Die Autoren sind zwei Chemiker, die sich einen Namen gemacht haben: Die freie Journalistin Gabrielle Walker war Redakteurin beim renommierten Wissenschaftsmagazin »Nature«; der in Südafrika geborene David King wirkte von 2001 bis 2007 als Chief Scientific Adviser der britischen Regierung. An akademischer Erfahrung mangelt es beiden nicht: Walker lehrte in Princeton, und King bekleidete einen Lehrstuhl für physikalische Chemie in Cambridge.

»Ganz heiß« beginnt mit Kings These (»Science«, 9. Januar 2004), das Problem des Klimawandels sei noch ernster als die Bedrohung durch den Terrorismus. Im weiteren Verlauf pflegen die Autoren einen gemäßigteren Stil und behaupten, in der Klimadebatte eine mittlere Position einzunehmen. »Dieses Buch ist kein allgemeiner Ruf zu den Waffen zum Schutze der Umwelt.« Vielmehr gehe es um »ganz spezifische Lösungen für ein ganz spezifisches, wenn auch weitreichendes Problem«. In drei Kapiteln berichten Walker und King über die wissenschaftlichen Grundlagen des Klimaproblems, die technischen Lösungen und die politischen Maßnahmen. Diese Tour d'Horizon ist nur teilweise geglückt, aber da, wo das Buch misslingt, verrät es viel über die zahllosen Tücken der Klimadebatte.

Das erste Kapitel ist wohl das schwächste. Warum CO_2 und Konsorten eine Klimakrise auslösen könnten, das hat man schon besser beschrieben gesehen. »Durch Eiskerne wissen wir …, dass mit steigendem Kohlendioxidgehalt auch die Temperatur steigt.« Diese Unwahrheit ist nicht ihre einzige tendenziöse Darstellung der Klimaforschung. In Wirklichkeit kletterte in den letzten Eis- und Warmzeiten immer erst die Temperatur – der Kohlendioxidgehalt stieg ein paar hundert Jahre danach an. Im Anhang (in welchem die Autoren »Klimamythen, Halbwahrheiten und Missverständnisse« aufklären) steht es richtig.

In Kapitel zwei präsentieren die Autoren in verständlicher Form alle derzeit diskutierten Ansätze zur Verringerung von CO_2-Emissionen. Das Energiesparen ziehen sie wegen seiner größeren Wirksamkeit dem Ausbau erneuerbarer Energiequellen vor. Was die Energieproduktion angeht, so scheuen sich die Chemiker nicht vor unpopulären Vorschlägen. Sie sind der Auffassung, »dass eine neue Generation von Atomkraftwerken zumindest eine … Zwischenlösung in Ländern sein wird, die schon über die Technologie verfügen …, bis neue kohlenstoffarme Energiequellen verfügbar werden«. Überdies würden neue Kraftwerkstypen deutlich weniger strahlenden Müll produzieren als die betagteren. Ob dieses Argument genügt, um den Betrieb von Kernkraftwerken weniger kritisch zu sehen, muss jeder für sich entscheiden.

Bei den politischen Lösungen knüpfen Walker und King an den »Stern Review« an, einen Report von 2006 über die Kosten des Klimawandels, den die britische Regierung in Auftrag gegeben hatte. Demzufolge kommt es uns billiger, heute in den Klimaschutz zu investieren, als die ansonsten entstehenden Schäden zu bezahlen. Einige Ökonomen ha-



Abweichung der Temperatur auf der Nordhalbkugel vom Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, gemessen (schwarz) und mit verschiedenen Methoden rekonstruiert (farbig)

ben den »Stern Review« wegen verfehlter wirtschaftlicher Grundannahmen kritisiert. Der Diskontsatz, mit dem künftige mit gegenwärtigen Kosten verrechnet werden, sei viel zu niedrig angesetzt. Die Höhe dieser Rechengröße ist jedoch maßgeblich davon abhängig, »wie wichtig uns unsere Enkelkinder sind – … was zunächst einmal eine ethische und erst dann eine finanzielle Frage ist … Daher erscheint es als ein hoffnungsloses Unterfangen, die zu erwartenden Schäden präzise zu beziffern«.

Diese Aufrichtigkeit macht einen guten Eindruck. Umso unangenehmer fällt anschließend auf, dass Walker und King die Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel bloß im Vorübergehen streifen. Diese, so argumentieren sie nonchalant, seien ja sowieso nötig – »unabhängig davon, was wir jetzt unternehmen, um die Auswirkungen der künftigen Erwärmung abzumildern«. An dieser Stelle scheuen die Autoren die Auseinandersetzung mit Gegenargumenten. Dabei kann man jeden Euro nur einmal ausgeben: Ob Maßnahmen zur Emissionsreduktion oder zur Anpassung an den Klimawandel Priorität genießen sollen, ist nicht a priori klar und darum zu Recht Gegenstand heißer Debatten.

Was die Klimapolitik angeht, zählen Walker und King zu den Hardlinern, jedenfalls verkünden sie entsprechende Ziele. So fordern sie, die Industrieländer müssten ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 Prozent gegenüber 1990 senken. Den Entwicklungsländern soll wie allgemein üblich eine Übergangszeit eingeräumt werden.

Sind diese Forderungen realistisch? Nun, immerhin wurden in den letzten Jahren vielfältige Strategien entwickelt, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Weltwirtschaft zu vollziehen. Die Autoren haben zu diesem Thema einen nützlichen Abriss verfasst. »Die entscheidende internationale Konferenz, auf die wir unsere Hoffnung richten, ist der UN-Klimagipfel in Kopenhagen im Dezember 2009.« Die politischen Positionen zum Klimaproblem gehen allerdings immer noch weit auseinander, wie sich aus der sehr aktuellen Über-sicht über die Klimapolitik in den wichtigsten Industrie- und Entwicklungsländern der Erde erschließt.

Am Ende des Buchs steht ein Aufruf zum persönlichen Handeln, der arg pädagogisch und gewollt optimistisch wirkt. Vielleicht war es genau dieser gute Wille, der die Verfasser daran gehindert hat, ein ausgewogeneres Werk vorzulegen.

Sven Titz

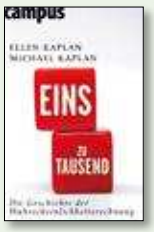
Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Gabrielle Walker und David King
Ganz heiß
Die Herausforderungen des Klimawandels
Aus dem Englischen von Friedrich Griese.
Berlin Verlag, Berlin 2008.
304 Seiten, € 22,90

WAHRSCHEINLICHKEITSTHEORIE

Chance verspielt

Unterhaltsam berichten Ellen und Michael Kaplan aus der Welt des Zufalls, lassen dabei aber allzu oft inhaltliche Tiefe vermissen.



Für ihr Buch »Eins zu Tausend« wollten Ellen und Michael Kaplan scheinbar nichts dem Zufall überlassen. Unterhaltsam aufbereitet, zeugen altbekannte statistische Phänomene von der besonderen Faszination dieser Wissenschaft. Doch Vorsicht: Die Geschichte der Wahrscheinlichkeitsrechnung erzählen die Kaplans nicht, entgegen dem Untertitel, der sich zu Unrecht in die deutsche Übersetzung geschlichen hat.

Dafür beweisen sie aber durchaus ein gutes Gespür für den besonderen Reiz des Fachs: Gekonnt spannen sie etwa gleich zu Beginn den Bogen vom Galton-Brett und dem pascalschen Dreieck hin zur Normalverteilung. Obwohl die einzelnen Abschnitte relativ unabhängig sind, folgen sie doch einer Chronologie. Bei diesem Lauf durch die Jahrhunderte werden auch stets die Menschen hinter den mathematischen Fragestellungen vorgestellt. In diesen ebenso treffenden wie vergnüglichen Charakterisierungen liegt die Stärke des Autorenduos.

Dass die Kaplans – Mutter Ellen ist Lehrerin für Geschichte und Naturwissenschaften, Sohn Michael studierter Historiker und freier Autor – auch den Umgang mit anspruchsvolleren Themen beherrschen, zeigen sie in einem sehr gelungenen Kapitel über den Einsatz statistischer Methoden in der medizinischen Forschung. Darin weisen sie begründet auf die Fallen und Tücken klinischer Studien hin und mahnen zu besonderer Sorgfalt, beginnend schon bei der Versuchsplanung.

Warum nicht mehr davon? Haben sich die Autoren dieselbe Qualität in anderen Bereichen etwa nicht zugetraut? Schade ist es allemal. Auch der anfängliche Unterhaltungswert des Buchs nimmt durch sehr lange Handlungspausen rapide ab.

Wozu die viel zu ausführlich geratene Abhandlung über die geschichtliche Entwicklung des Versicherungswesens, wenn die zu Grunde liegenden Anwendungen der Statistik ohnehin nur angerissen werden? Mehr Mut zu inhaltlicher Tiefe hätte dieses Buch stark aufgewertet. So bleibt an manchen Stellen ein recht unbefriedigtes Gefühl zurück.

Christoph Marty

Der Rezensent studiert Wissenschaftsjournalismus in Dortmund.

Ellen Kaplan, Michael Kaplan
Eins zu Tausend
Die Geschichte
der Wahrscheinlichkeitsrechnung
Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2007.
390 Seiten, € 22,–

GEISTESGESCHICHTE

Was ist der Mensch?

Der Kampf um die Deutungshoheit, der Mitte des 19. Jahrhunderts in drei bedeutenden Auseinandersetzungen entflammte, dauert im Wesentlichen bis heute an.

Seit Jahren wimmelt es in den deutschen Feuilletons von kämpferischen und polemischen Ankündigungen, neue Erkenntnisse der Neurowissenschaften machten grundlegende Vorstellungen wie Willensfreiheit oder Schuld obsolet. Philosophen und andere Geisteswissenschaftler reagieren oft vorhersehbar empfindlich gegen solche Behauptungen.

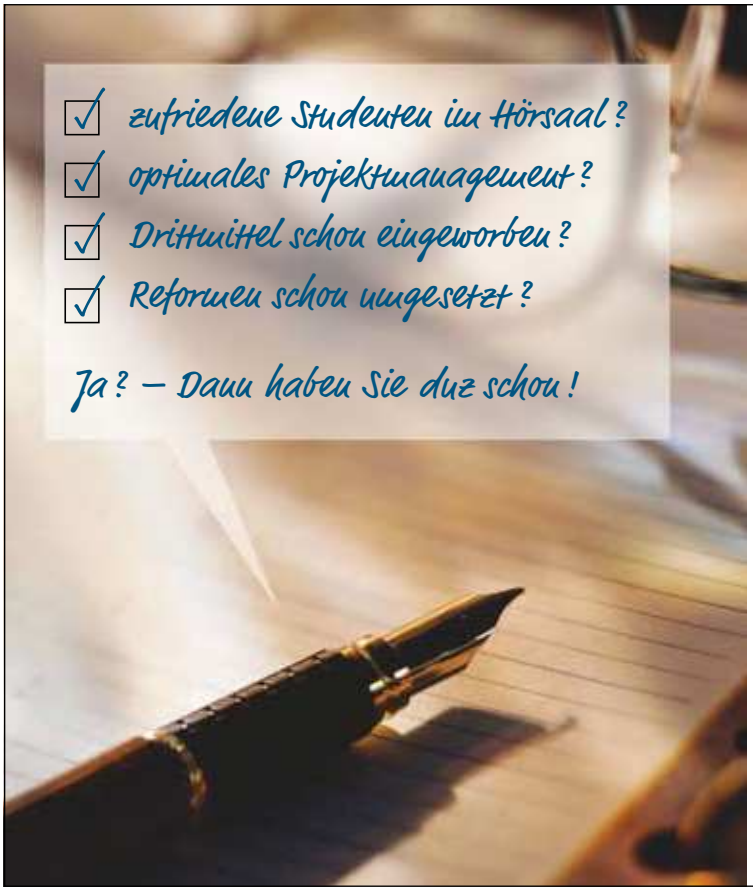
Häufig wird dabei übersehen, dass diese Auseinandersetzung alles andere als neu ist. Im 19. Jahrhundert etablierten sich die Naturwissenschaften unwiderruflich als dritte kulturelle und akademische Kraft neben der Theologie und der Philosophie – und viele ambitionierte Naturwissenschaftler hätten am liebsten die anderen Fakultäten nicht nur ergänzt, sondern gänzlich verdrängt. In Deutschland entbrannte dieser Streit um die weltanschauliche Deutungshoheit und um erkenntnistheoretische Dominanzansprüche in drei stürmischen, zeitlich aufeinander folgenden und personell sich überschneidenden Debatten: dem Materialismus-, dem Darwinismus- und dem Ignorabimus-Streit.

Nur die Auseinandersetzung um den Darwinismus ist in der breiten Öffentlichkeit gegenwärtig geblieben, während die beiden anderen, da sie überwiegend auf den deutschsprachigen Raum beschränkt blieben, keine vergleichbare Aufmerksamkeit fanden. Die Philosophen Kurt Bayertz aus Münster, Myriam Gerhard aus Oldenburg und Walter Jaeschke aus Bochum haben nun zu jeder der drei Diskussionen einen historisch-kritisch orientierten Sammelband herausgegeben, der über die Dokumentation hinaus die Kontinuitäten und Brüche in der öffentlichen Auseinandersetzung zu diesem Thema bis heute in vorbildlicher Breite erhellt.

Es kann hier nicht auf Details der zahlreichen Einzelbeiträge eingegangen werden. Ein zusammenfassendes Urteil fällt aber leicht: Es gelingt den Herausgebern und Autoren, ein nüchternes, unpolemisches, gleichwohl faszinierendes, fassettenreiches und lesbares Bild zu zeichnen.

Materialismus

In allen drei Auseinandersetzungen ging es letztlich um die Frage »Was ist der Mensch?«. Der 1854 von dem konservativen Physiologen Rudolf Wagner angestoßene Materialismus-Streit bietet die deutlichsten Berührungspunkte mit den aktuellen Debatten: Ist das menschliche Bewusstsein nichts anderes als die notwendige, mechanische Folge physikalischer und chemischer Vorgänge? Das Bild des Menschen als Maschine war schon in der Aufklärung ein Mittel, überlieferte Metaphysik und Religion und insbesondere den Dualismus von Körper und Seele herauszufordern. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gelangten jedoch viele Wissenschaftler zu der Überzeugung, mit Hilfe der Fortschritte der Physio-



duz MAGAZIN und duz NACHRICHTEN

informieren Sie umfassend und garantiert unabhängig. Im Mittelpunkt stehen Aktuelles und Hintergründiges aus Wissenschaft und Hochschule sowie konkret umsetzbare Tipps für den akademischen Alltag.

duz – Das unabhängige Hochschulmagazin

14-täglich im Wechsel das duz MAGAZIN (mit zwölf Seiten duz WERKSTATT) und die duz NACHRICHTEN – zudem die duz SPECIALS. Außerdem unser großer akademischer Stellenmarkt: Attraktive Positionen eröffnen Ihnen neue berufliche Aufstiegsmöglichkeiten.
—› Weitere Informationen erhalten Sie im Internet unter http://www.duz.de

Nutzen Sie die Chance: Bestellen Sie jetzt ein kostenloses Probeabonnement.

Das unabhängige Hochschulmagazin
duz
60 Jahre Know-how im Hochschulbereich!

logie diese Spekulationen endlich mit robusten empirischen Erkenntnissen untermauern zu können. Die immaterielle Seele als Quelle der Moral und der menschlichen Identität war in dieser Sichtweise nur eine Illusion, Bewusstsein und Moral lediglich ein physiologisches Sekret des Gehirns.

Aber der Materialismus-Streit hatte auch einen ungemein politischen Aspekt. Linkshegelianer wie Ludwig Feuerbach (1804–1872) und Karl Marx (1818–1883) formulierten in den 1830er Jahren eine religionskritische und materialistische Philosophie. Politisch und akademisch wurden deren Vertreter später jedoch kaltgestellt. Nach der gescheiterten Revolution von 1848 wurde der radikale Materialismus naturwissenschaftlich erweitert und zum Bündnispartner einer »Realpolitik«, die einen langfristigen demokratischen Wandel anstrebte.

Auf der wissenschaftlichen Ebene arbeiteten, wie Michael Hagner herausstreicht, Hirnanatomen beider Lager mit den gleichen Methoden, ähnlichen Grundannahmen und identischer Terminologie. Die Existenz oder Nichtexistenz einer immateriellen Seele war ein weltanschaulich bestimmter Ausgangspunkt, der von keiner Seite empirisch fundiert werden konnte.

Der Umgang mit dem Nichtwissen ist auch symptomatisch für die heutige Debatte. In der Naturwissenschaft haben nur neue Wissenslücken alte abgelöst. Damals wie heute ist es nicht zu rechtfertigen, Weltanschauungen oder gesellschaftspolitische Forderungen mit diesem unsicheren Wissen zu begründen. Damals wie heute gehen die ehrgeizigen Schlussfolgerungen vieler Wissenschaftler oft weit über das empirisch Belegbare hinaus.

Darwinismus

Die Evolutionslehre bietet den besten Modellfall für die Umgestaltung einer wissenschaftlichen Lehre zu einer vielschichtigen und oft widersprüchlichen Weltanschauung namens »Darwinismus«. Die terminologische Flexibilität von Darwins Theorie machte ihre Aneignung durch verschiedene Denkschulen einfach. Materialisten betonten den mechanischen Charakter des Evolutionsprozesses, erlagen aber häufig der Versuchung, die Evolution höchst undarwinistisch als Motor des politischen und gesellschaftlichen Fortschritts aufzufassen. Eine – wissenschaftlich korrekt – vom Zufall getriebene Evolution hätte ihnen als Grundlage einer Weltanschauung schwerlich ins System gepasst. Christen dagegen deuteten die »natürliche Auslese« als ein von Gott erwähltes Steuerungsmittel. Ein solcher christlicher Darwinismus hatte viele Vertreter in den Vereinigten Staaten und Großbritannien, fand aber nie Anhänger in Deutschland.

Die Vielfalt der Deutungsmöglichkeiten macht den Darwinismus zu einem Sonderfall. Anders als im Materialismusstreit waren die politischen Grenzziehungen nie eindeutig. Dies erklärt wohl die dauerhafte Attraktion und Abneigung, die der Darwinismus außerhalb der akademischen Biologie immer noch hervorzurufen vermag.

Christen deuteten die »natürliche Auslese« als ein von Gott erwähltes Steuerungsmittel

Ignorabimus

Zwei Fragen könne die Wissenschaft auf der Grundlage der klassischen Physik grundsätzlich nicht beantworten: was Materie und Kraft seien und wie das Bewusstsein aus seinen materiellen Grundlagen ableitbar sei. Mit dieser These wollte der Berliner Physiologe Emil du Bois-Reymond in seiner Rede »Die Grenzen der Naturerkenntnis« 1872 einen Waffenstillstand zwischen den natur- und den geisteswissenschaftlich fundierten Geltungsansprüchen herbeiführen. Viele haben diese Rede jedoch als Kapitulation missverstanden. Der Waffenstillstand hat im Wesentlichen bis heute Bestand, wird jedoch ständig angefochten. Immerhin ist eine feste Grenzziehung wie die von du Bois-Reymond mit dem Fortschritt der Wissenschaft schwerlich zu vereinbaren. Die Anerkennung einer Grenze und Versuche, sie verwegen zu überschreiten, sind seither ständige Begleiter der Konfrontation zwischen Natur- und Geisteswissenschaften.

Bei allem Lob für die Leistung der Herausgeber und Autoren bleiben einige allgemeine Kritikpunkte. Zum einen spielt der gewählte Deutungsrahmen alles, was sich nicht in die drei Debatten einordnen lässt, herunter; und davon geschah im 19. Jahrhundert in den Wissenschaften vom Menschen allerlei. Zum anderen wird mancher Figur vielleicht zu viel oder die falsche Bedeutung beigemessen. So war zum Beispiel Ernst Haeckel (1834–1919) eine herausragende Figur im Darwinismus-Streit, aber sein Einfluss auf die Entwicklung der universitären Biologie war letztendlich gering. Seine evolutionäre Morphologie befand sich in einem kontinuierlichen Kampf um Ressourcen mit Medizinern, die kein Interesse an einer evolutionären Perspektive hatten, sondern als nützlicher eingeschätzte Ziele verfolgten.

Die akademische Dominanz der Theologie und Philosophie war im späten 19. Jahrhundert zwar gebrochen, aber deutlich geschwächt waren diese Disziplinen nicht. Sie wurden Bestandteil der auf Forschung – und nicht nur auf die Ausbildung von Juristen, Geistlichen, Lehrern und Ärzten – ausgerichteten Universität und definierten sich zunehmend als Wissenschaften. Schon im 18. Jahrhundert begannen Theologen die Bibel als historisches, nicht als buchstäblich göttlich offenbartes Dokument zu lesen, und diese wichtige Entwicklung war philologisch, nicht naturwissenschaftlich inspiriert.

Eine andere wichtige, nicht auf die Physiologie des Individuums abzielende Erklärungsoption kam aus der neuen Disziplin der Statistik. Der flämische Astronom Adolphe Quetelet (1796–1874) entwarf eine »soziale Statistik«, die das Verhalten einer Durchschnittsperson mess- und vorhersehbar machen wollte. Seine Untersuchungen zur Statistik der Kriminalität führten auch zu Debatten über Willensfreiheit und sozialen Determinismus.

Aus der Gemengelage von Materialismus, Darwinismus und überlieferten Lehren entstanden auch Strömungen der modernen Psychologie und die Psychoanalyse, die sich nicht einfach den beiden Lagern von Natur- und Geisteswissenschaften zuordnen lassen.

Vielleicht hätte man sich nur einen weiteren Band wünschen können. Dieser Wunsch tut aber der Qualität des existierenden Werks keinen Abbruch.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist Wissenschaftler am Gemeinsamen Forschungszentrum der EU-Kommission in Ispra (Italien) und Autor.

Kurt Bayertz, Myriam Gerhard und Walter Jaeschke (Hg.)
Weltanschauung, Philosophie und Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert
Band 1: Der Materialismus-Streit
Band 2: Der Darwinismus-Streit
Band 3: Der Ignorabimus-Streit
Felix Meiner, Hamburg 2007.
336 / 275 / 283 Seiten, € 48,– pro Band

THRILLER

Verwirrung der Gefühle, drahtlos

Die Fähigkeit, die Empfindungen anderer Menschen zu steuern, ist Segen und Fluch zugleich – und Stoff für einen spannenden Roman.

Der Grundgedanke von Adam Fawers neuem Thriller ist kaum weniger realitätsfern als die drahtlose Gedankenübertragung (»Telepathie«), mit der sich die Science-fiction-Literatur bis zum Überdruss beschäftigt hat, aber bescheidener: drahtlose Gefühlsübertragung.

Wie das physikalisch vonstattengehen soll, muss man so genau nicht wissen. Niederfrequente elektromagnetische Wellen sollen es sein, erzeugt durch die kollektive Aktivität der Neurone im Gehirn eines Menschen. Die – in der Wissenschaft ernsthaft diskutierten – Spiegelneurone im Gehirn eines anderen Menschen geraten in Resonanz mit diesen Wellen und erwecken in ihrem Träger just dasselbe Gefühl.

Gefühlswellen können einige Meter Entfernung überwinden und Wände durchdringen. Hautkontakt verstärkt die Übertragung, ein geeignetes Stück magnetisiertes Metall, am Körper getragen, schirmt die Signale wirksam ab. Nähere Einzelheiten verschweigt der Roman – unvermeidlich, sonst würde die wissenschaftliche Unhaltbarkeit der Grundidee offenbar werden; zu allem Überfluss sind die Passagen zur Physik noch falscher, als diese Idee erfordert.

Aber das macht nichts. Fawer hat die Konsequenzen der kontrafaktischen Grundannahme meisterhaft zu einer höchst spannenden Geschichte verarbeitet.

Nur wenige Ausnahmemenschen, die Empathiker, verfügen überhaupt über eine ausreichende Sende- und/oder Empfangsleistung, um Empfindungen von ihren Mitmenschen aufnehmen oder an sie übertragen zu können. Sie sind regelmäßig Synästhetiker, also Leute, die »Farben hören und Töne schmecken« (Spektrum der Wissenschaft 9/1997, S. 118).

Auf den ersten Blick ist eine solche Begabung ungeheuer beneidenswert. Fawer spart zu Beginn nicht mit Szenen, in denen ein Mensch per Neuroresonanz seine heftige Liebe an einen anderen überträgt und daraufhin beide in den siebten Himmel des Glücks entschweben. Die totale Harmonie der Gefühle, auf drahtlosem Weg hergestellt – was will man mehr?

Nach dem streng materialistischen Standpunkt des Buchs sind Gefühle nichts weiter als neuronale Aktivitätsmuster. Die physiologischen Reaktionen wie Erröten, Herzklopfen oder Beklemmung, die wir als Folge von Gefühlen erleben, sind im Wesentlichen diese Gefühle selbst. Also ist ein von einem Empathiker induziertes Glück genauso echt wie ein selbst erlebtes, denn es ist, nun ja, eben selbst erlebt.

Wer willentlich Gefühle an andere übertragen kann, hat eine ungeheure Macht über seine Mitmenschen – und zieht damit unweigerlich finstere Mächte an, die diese Macht für ihre eigenen Zwecke einspannen wollen. Bei Fawer ist es »die Organisation«, unter der man sich die CIA vorstellen darf. Ein kleiner Doktor Faustus verkauft für unbegrenzte Forschungsmöglichkeiten seine Seele an die Organisation und ergründet in brutalen Menschenversuchen die Wirkungsweise der Empathie.

Ein von einem Empathiker induziertes Glück ist genauso echt wie ein selbst erlebtes

Nicht nur für die amtlichen Finsterlinge des Romans ist dieses Phänomen neu; auch die Empathiker selbst werden von ihren Fähigkeiten, die ungefähr mit der Pubertät erwachen, überrascht. Wer mit ihnen zu tun hat, lernt den eigenen Gefühlen zu misstrauen: Ist der Lehrer selbst derjenige, den plötzlich diese Wut überkommt, oder stammt sie von seinem empathischen Schüler? Die schöne Darian macht sich den edlen Laszlo durch Ausstrahlung von Liebesgefühlen gefügig – und kann nicht verhindern, dass sie sich in ihn verliebt. Dagegen erkennt er viel später, dass sie ihn benutzt hat, und verstößt sie, weil er seinen und ihren – diesmal echten – Gefühlen nicht mehr traut.

Um ihre empathischen Schüler vor den Nachstellungen der Organisation zu schützen, blockieren die Lehrer ihre Fähigkeiten.

Spektrum der Wissenschaft
D I G I T A L

In unserem Archiv finden Sie alle bisher erschienenen **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993.

>> Sie können nach einzelnen Artikeln recherchieren und diese als PDF-Dateien für € 1,– kaufen.

>> Wir bieten Ihnen auch die einzelnen **Spektrum der Wissenschaft**-Ausgaben komplett als digitales Heft für € 5,– an. Somit sind auch ältere, bereits vergriffene Ausgaben wieder für Sie erhältlich.

>> Sie können **Spektrum der Wissenschaft** auch komplett als Digital-Ausgabe für € 60,– im Jahr abonnieren: www.spektrum.de/digitalabo

Spektrum-Abonnenten haben freien Zugriff auf die Digital-Ausgaben!

Zugang zum Archiv finden Sie unter

www.spektrum.de/archiv

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Aber 15 Jahre später bricht diese Sperre, und die mittlerweile Erwachsenen müssen sehr mühsam lernen, mit ihren wieder erworbenen Fähigkeiten umzugehen. Inzwischen ist die finstere Organisation von einem Superbösewicht in den Schatten gestellt worden, dem stärksten Empathiker der Welt. Von krankhaftem Hass zerfressen, will er seine überlegenen Fähigkeiten für eine Mordserie globalen Ausmaßes nutzen. Die große Menschenmenge, die sich zu Silvester 2007 auf dem Times Square in New York versammelt, soll ihm dafür als Gefühlsverstärker dienen.

In seinem Verlauf gerät der Roman immer mehr ins Fahrwasser des klassischen amerikanischen Thrillers. Es gibt sehr viel Gewaltanwendung – die Empathie spielt dabei nur eine Nebenrolle – und zahlreiche Tote. Mit einem Übermaß an Rückblenden, die insgesamt mehr Verwirrung als Spannung erzeugen, steuert der Roman auf den Silvester-Showdown zu – und endet seltsam unschlüssig. Viele unterwegs geknüpfte Handlungsstränge führen am Ende ins Leere. Es siegen zwar – mit knapper Not, damit es spannend bleibt – die Guten, und der Superbösewicht liegt zertrampelt am Boden. Aber so wie der Roman gestrickt ist, könnte er das ohne Weiteres überraschend überleben; eine andere Bösewichtin, die am Ende lebendig wieder auftaucht, war zwischendurch übler zugerichtet.

Es scheint, als hätte der Autor sein Werk wegen drohender Überlänge vorzeitig zu Ende bringen müssen. Aber die Grundidee und ihre Durchführung sind richtig gut.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Adam Fawer
Gnosis
Aus dem amerikanischen Englisch von Jörn Ingwersen.
Kindler, Reinbek 2007. 720 Seiten, € 19,90

PRAKTISCHE ÖKOLOGIE

Nicht für den Kochtopf

Mit einem Vogelhäuschen bereichert man ganz pragmatisch die belebte Natur und das eigene Erleben.

Die Lausfliegen, stark an das Leben im Vogelgefieder angepasste Blutsauger, legen ihre verpuppungsreifen Larven in das warme Nest. Die ausschlüpfenden Fliegen fallen dann die schon befiederten Jungvögel oder die fütternden Alten an.

Dieses Buch bietet weit mehr als einfache Bastelanleitungen für Nisthilfen. Die erfahrenen Autoren Klaus Richarz und Martin Hormann von der Staatlichen Vogelschutzwarte in Frankfurt am Main stellen die unterschiedlichen Wohnraumbedürfnisse ihrer Schützlinge in den ökologischen Zusammenhang: Wie leben und nisten die Tiere unter natürlichen Bedingungen? Was ist neben der passenden Nisthilfe für den Bruterfolg entscheidend? Wovon ernähren sich die Tiere, und ist genug Futter erreichbar? Die Autoren beschränken sich nicht auf Vögel (vom Spatz bis zum Schwarzstorch), sondern beziehen andere schutzbedürftige Tiere wie Fledermäuse, Bienen oder Hornissen, Amphibien und Igel mit ein. Sie stellen die kommerziell zu erwerbenden Nisthilfen vor und haben auf einer CD-ROM praktische Anleitungen, Baupläne und Adressen zusammengefasst.

Nebenher gibt es einige überraschende Informationen: Die ersten Vogelkästen dienten nicht dem Vogelschutz, sondern zum Fangen fetter Jungstare für den Kochtopf (»Starensuppe«). Der Hausrotschwanz bewohnt eigentlich Nischen im Fels; in unseren Städten nimmt er deshalb gerne einen Halbhöhlennistplatz an. Der Spatz ist mit den in Afrika in Kolonien brütenden Webervögeln verwandt. Man tut ihm also mit einer »freistehenden Villa« keinen Gefallen – er bevorzugt das »Reihenhaus für Spatzen« oder gar das Ambiente eines »Mehrfamilienhauses«.

Die Autoren gehen auch auf die Bedrohung vieler Tierarten ein: Durch menschliche Aktivitäten verschwinden nicht nur natürliche Lebensräume und Nahrungsquellen; durch die Versiegelung von Wegen ist auch der Lehm zum Bauen der Nester nicht mehr verfügbar. Andererseits haben die fast verschwundenen Schwarzstörche in Deutschland mittlerweile mehr als 300 Nistplattformen angenommen.

Ich kann das Buch jedem empfehlen, der sich aktiv für Tiere und Natur engagieren und gleichzeitig das eigene (Er-)leben bereichern möchte, egal ob auf dem Balkon oder im Garten. Auch Naturschutzgruppen, die am Wasser oder im Wald aufwändigere Schutzmaßnahmen umsetzen möchten, oder Lehrer, die das Thema Ökologie und Naturschutz mit einer handfesten Aktion koppeln wollen, finden detaillierte Informationen – zum Beispiel wie Kommunen, Kirchengemeinden und Stromversorger in Schutzprojekte mit eingebunden werden können.

Ursula Loos

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und arbeitet nach langjähriger Mitarbeit bei Spektrum Akademischer Verlag als freie Übersetzerin, Autorin und Lektorin.

Klaus Richarz und Martin Hormann
Nisthilfen für Vögel
und andere heimische Tiere
Mit 80 Bauanleitungen auf CD-ROM.
Aula, Wiebelsheim 2008. 296 Seiten, € 19,95

VORSCHAU

Heft Juli 2008
ab 24. Juni im Handel

ILLUSTRATION: LUNAR RADIO OBSERVATORY PROJECT

Vorstoß an die Grenzen

Mit Radioteleskopen einer neuen Generation wollen Forscher die frühe kosmische Ära der Reionisation enträtseln. Das Instrument Lofar wird sich in wenigen Jahren über ganz Europa erstrecken

WEITERE THEMEN IM JULI

Hunde und ihre Gene

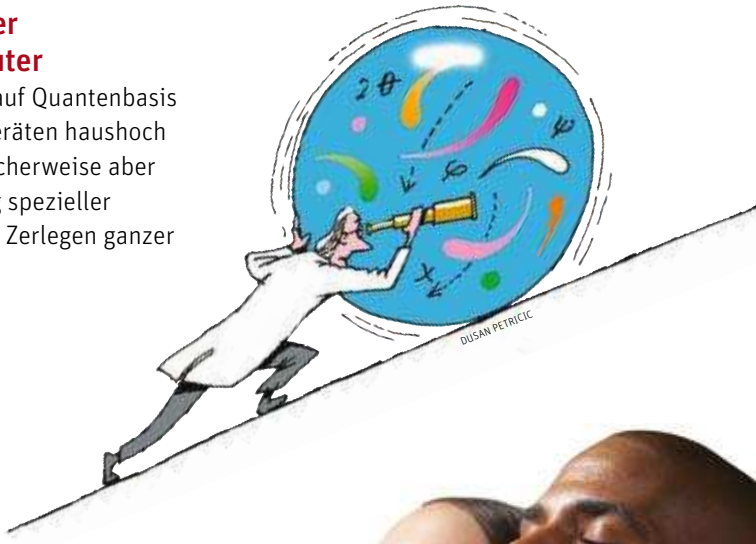
Warum sind Hunderassen völlig verschieden? Die genetischen Rätsel zu lösen, hilft den Züchtern – und der Humanmedizin

Archäologie Westafrikas

Vor fast 3000 Jahren gedieh die Nok-Kultur im heutigen Nigeria. War sie ein Meilenstein auf dem Weg zu den ersten Hochkulturen?

Die Grenzen der Quantencomputer

Künftige Rechner auf Quantenbasis wären heutigen Geräten haushoch überlegen – möglicherweise aber nur bei der Lösung spezieller Aufgaben wie dem Zerlegen ganzer Zahlen in Faktoren



DUSAN PETRICIC

Vielseitiges Vitamin D

Das Sonnenvitamin kann weit mehr als nur die Knochen stärken. Ist ein verbreiteter Vitamin-D-Mangel mit schuld an Krebs, Diabetes und Muskelschwund?

JAMES PORTO

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter